

fizikai szemle

2021/12

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:
Lendvai János

Szerkesztőbizottság:

Bíró László Péter, Bokor Nándor, Czitrovsky Aladár, Füstöss László, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Ormos Pál, Pálfalvi László, Papp Katalin, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

Egy tipikus spinodális mintázat keresztmetszeti képe. Jáger Gabriella és társai írását lásd a 414–420. oldalakon.

TARTALOM

*Kovács Tamás: Poincaré-féle visszatérési térképek és alkalmazásuk
Dinamikai rendszerek elemzése fázistérbeli visszatérésekkel* 401

*Bányász István: Tökéletlen holográfia
A hologramok pontatlan rekonstrukciójából eredő geometriai optikai aberrációk vizsgálata* 409

*Jáger Gabriella, Tomán János, Erdélyi Zoltán: Beágyazott kvantumpöttyök és plazmonikus nanorészecskék létrehozása önszerveződéssel
Alacsony energiájú ionokkal implantált minta bőkezelése során kialakuló kvantumpöttyök, vagy plazmonikus nanorészecskék keletkezésének folyamata* 414

Helyreigazítás 436

A FIZIKA TANÍTÁSA

*Schnider Dorottya, Hömöstrei Mihály: Kompetenciafejlesztő fizikatanítás
A frontális oktatást olyan tanulócentrikus oktatással érdemes kiegészíteni amelyben az aktív résztvevő diák élmény- és tapasztalatszerzés útján mélyíti el ismeretét* 421

*Kirsch Éva: A vonzás hatalma
Beszámoló a 63. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatóról* 429

HÍREK – ESEMÉNYEK

Vincze János: Hatvan éve vette át Nobel-díját Békésy György 436

www.fizikaiszemle.hu/mellekletek

Kármán Tamás: A Fizikai Szemle 2022. évi falinaptára

T. Kovács: Poincaré's return maps and their application

I. Bánász: Imperfect holography

G. Jáger, J. Tomán, Z. Erdélyi: Embedded quantum dots and plasmonic nanoparticles by self-organization

Rectification

TEACHING PHYSICS

D. Schnider, M. Hömöstrei: Competence-developing physics teaching

Kirsch Éva: The power of attraction

EVENTS

J. Vincze: György Békésy received his Nobel Prize sixty years ago

www.fizikaiszemle.hu/mellekletek

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtítká, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem örzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 1000.- Ft (duplaszámé 2000.- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és HU ISSN 1588–0540 (online)

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



POINCARÉ-FÉLE VISSZATÉRÉSI TÉRKÉPEK ÉS ALKALMAZÁSUK

Kovács Tamás
ELKH-ELTE

Dinamikai rendszerek – bevezetés

Egy rendszer állapotainak leírására szolgáló matematikai formalizmus a differenciálegyenlet vagy leképezés. Ezek segítségével kis lépésként egy adott kiindulási állapotból követhetjük a rendszer állapotjelzőinek időbeli változását. Determinisztikus esetben a jelen állapotból egy jövőbeli állapot következhet. Kivételes esetekben a megoldás zárt alakban egy képlettel is megadható, általánosságban azonban számítógép segítségével határozható meg. Ez utóbbi esetben lehetőség nyílik a megoldás kvalitatív vizsgálatára, ami képlet hiányában nyújt információt a megoldás bizonyos tulajdonságairól, főleg geometriai szempontból [1]. A rendszer állapotjelzőit felrajzolva egy fázis(tér)kép és a rajta megjelenő trajektóriák segítségével elemezhetjük a megoldást. Ezek a trajektóriák a rendszerre jellemző fázistérben helyezkednek el. A fázistér dimenziója megegyezik a rendszert leíró állapotjelzők számával. A matematikai inga esetében például 2 (szögkitérés és az ehhez tartozó sebesség). Összetettebb rendszerek esetén ez nagyobb szám. Éppen ezért a trajektóriák megjelenítése 3 dimenzió felett már nem kivitelezhető szemléletesen.

A dinamikai rendszerek kvalitatív leírásánál a trajektóriák geometriai tulajdonságaira támaszkodunk. A teljesség igénye nélkül néhány alapvető fogalmat mutatok be a továbbiak megértése céljából. A trajektóriák ugyan az időbeliséget nem mutatják, de alakjukból következtethetünk a mozgás típusára. Periodikus mozgás esetén a fázisrajtória egy önmagába visszatérő zárt görbe a fázistérben. Disszipatív rendszerek fázistérben megjelenhet egy alakzat, ami magához vonzza a különböző helyekről indított trajektóriákat. Vagyis szinte mindegy, mely fázispontból indul a trajektória, mindig ezen a halmazon köt ki, és a mozgás ezután innen nem is távolodik el. Ezeket az alakzatokat nevezzük attraktornak. A mozgás bonyolultságától függően az attraktorok különböző geometriai szerkezetet produkálnak, de közös tulajdonságuk, hogy vonzó halmazok. A fázistér szerkezetéről, geometriai tulaj-

donságairól e folyóirat régebbi köteteiben is olvashatunk [2, 3], illetve magyar nyelvű könyvekben [4, 5] is kimondottan részletesen tanulmányozhatjuk.

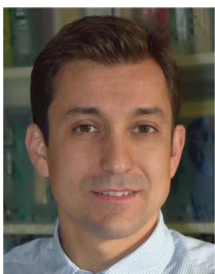
Meg kell még említeni a mozgások egy másik nagy csoportját. Nevezetesen a konzervatív dinamikai rendszereket. Az előzőekben bevezetettől eltérően a konzervatív rendszerek fázistérben nem lépnek fel attraktorok. Tehát nincs olyan jelenség, hogy több különböző kezdőfeltételből induló mozgás egyazon attraktoron végezze hosszú idő elteltével. Másképp megfogalmazva, konzervatív rendszerekben a trajektóriák „emlékeznek” honnan indultak. Ennek következtében a geometriai struktúra is merőben más, mint disszipatív esetben. Ennek mélyebb leírását is megtalálhatjuk magyar nyelvű tankönyvekben [6, 7].

Csak remélni tudom, hogy a szűkre szabott dinamikai rendszer-ismertető nem veszi el az olvasó kedvét a továbbiaktól, amelyben egy olyan módszert mutatok be, amellyel anélkül próbálunk következtetést levonni a dinamikai rendszer megoldásáról, hogy sem a leíró matematikai egyenleteket, sem a teljes megoldást nem ismerjük. Pusztán a rendszer egy részéről szerzünk információt, és ezt használjuk fel az analízis során.

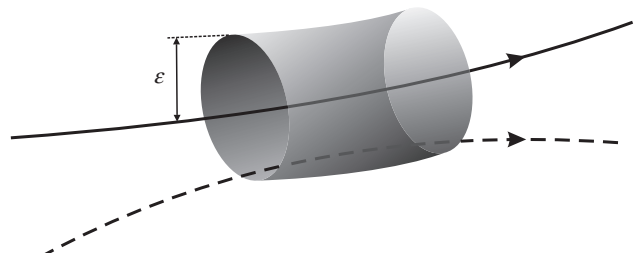
Poincaré-visszatérések

A dinamikai rendszerek elméletének egyik fontos eleme *Poincaré* visszatérési tétele. Ennek lényege, hogy minden konzervatív rendszer fázistérben a trajektóriák bizonyos idő elteltével (*Poincaré-féle* visszatérési idő) egy korábbi állapot előre meghatározott sugarú környezetébe térnek vissza (*1. ábra*). Ez a korábbi állapot kézenfekvőn lehet a kezdeti feltétel, ahonnan a mozgás indult, vagy a fázistérnek egy tetszőlegesen megválasztott részhalmaza. A visszatérés és a visszatérési idő természetesen függ az adott trajektória kezdőfeltételétől és a visszatérés általunk elvárt pontosságától. A visszatérési idők statisztikus vizsgálata mára elengedhetlenné vált alacsony di-

1. ábra. A fázisrajtória bizonyos idő után egy korábbi állapota adott sugarú környezetébe tér vissza *Poincaré* és *Kac* szerint.



Kovács Tamás csillagász, az ELKH-ELTE Extragalaktikus Asztrofizika Kutatócsoport munkatársa. Doktori értekezését égi mechanikából írta. Jelenlegi érdeklődési területei a nemlineáris dinamikai rendszerek, idősor-analízis, komplex hálózatok, valamint galaxisdinamika és -morfológia kapcsolata. Bolyai ösztöndíjas. A Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Program aktív témavezetője.



menziós rendszerek alapvető dinamikai tulajdonságainak (fázistérbeli diffúzió, ergodicitás, irregularitás) megértése céljából.

A tétel általánosítása (Kac-lemma) szerint a visszatérés átlagos ideje fordítottan arányos a szóban forgó tartomány mértékével (konzervatív esetben fázistér-fogatával). Ez az egzakt megfogalmazás már dissipatív rendszerekre is érvényes. A tapasztalat szerint a visszatérés valószínűsége diszkrét időben exponenciális lecsengést mutat, azaz n időlépés után adott tartományba való visszatérés esélye $p(n) \approx \exp(-\gamma n)$, γ lecsengési rátával [8].

A Poincaré-féle visszatérések tehát kvantitatívan is alkalmasak nemlineáris rendszerek dinamikai vizsgálatára. Hátrányuk, hasonlóan a Poincaré-metszetekhez, hogy csak 2-3 dimenziós fázistér esetén adnak szemléletes képet. Jelen írás elsődleges célja egy olyan módszer bemutatása, amely magasabb dimenziós rendszerekre is jól alkalmazható és szemléletes képet ad. Továbbá lehetővé teszi az adott dinamikai rendszer pusztán mérési adatokon alapuló vizsgálatát.

Visszatérési térképek dióhéjban

Eckmann és társai [9] bevezettek egy vizualizációs technikát az \mathbf{x}_i állapotvektor fázistérbeli visszatéréseire. Ennek lényege, hogy amennyiben a fázistrajektória egy i időpontbeli értékéhez egy későbbi j időpontban (adott közelségbe) visszatér, akkor ezt a tényt egy kétdimenziós bináris mátrixban (\mathbf{R}) kódoljuk. A mátrix mindkét tengelye időtengely és az (i, j) eleme 1-es (vagy grafikusan megjelenítve mondjuk kék) visszatérés esetén, egyébként pedig 0 (fehér). Az egyértelműség kedvéért öntsük matematikai formába a visszatérési térképet (VT)¹ a fent elmondottak alapján:

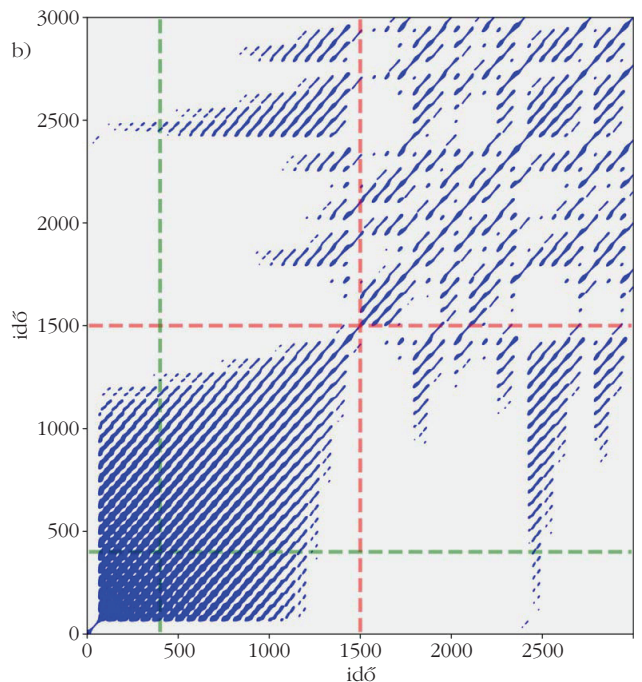
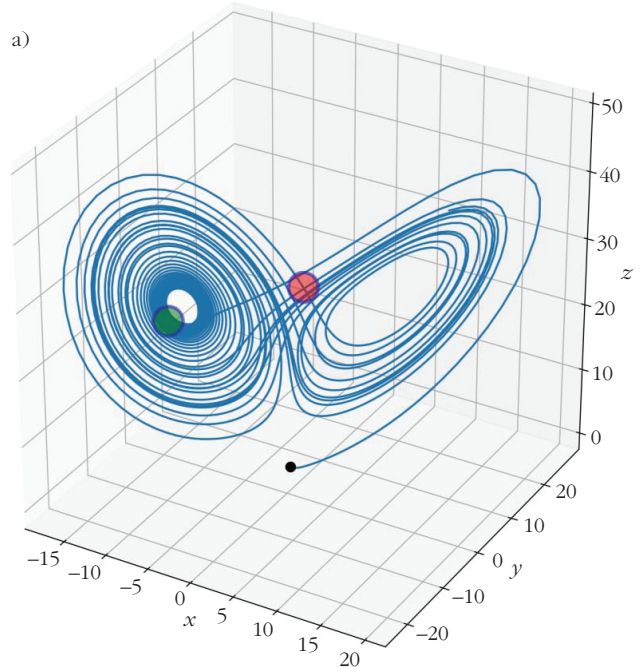
$$R_{ij} = \Theta(\varepsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|), \quad \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^m, \quad i, j = 1 \dots N,$$

ahol N a trajektória hossza (az állapotok száma a vizsgált mozgás során), ε a visszatérési küszöbérték, $\|\cdot\|$ egy adott norma a fázistérben, $\Theta(\cdot)$ pedig a Heaviside-féle lépcsőfüggvény.

Nézzünk egy példát! A Lorenz-modell egy háromdimenziós közönséges differenciálegyenleteket tartalmazó rendszer, amelyet a légköri konvekció jelensége motivált [5]. Bizonyos paraméterértékekre a jól ismert attraktort kapjuk a fázistérben. A 2.a ábrán a mozgás a fekete pontból indul. Az időbeli fejlődés során két helyen $t = 400$ -nál (zöld) és 1500 -nál (piros) monitorozzuk a visszatérést. Előbbi esetben szemmel látható, hogy a trajektória sokszor metszi a zöld tartományt, azaz gyakran visszatér a $t = 400$ időpontra lévő fázispont környezetébe. Míg a piros körben jóval ritkább a trajektória.

Mindez a visszatérési térképeken, 2.b ábra, kék pontok formájában jelenik meg a 400 (zöld) és 1500 (piros) időpontokhoz tartozó szaggatott vonalak men-

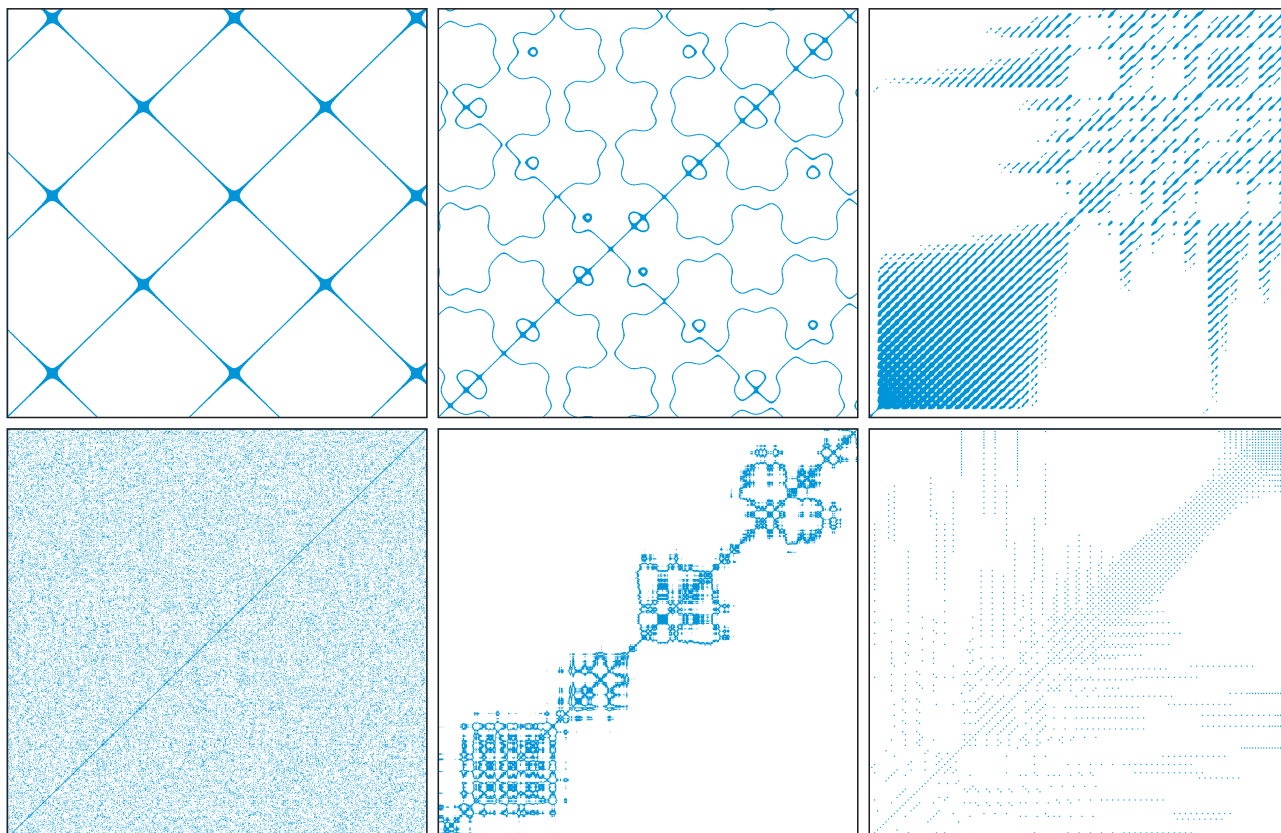
¹Matematikai formában az R jelölést használom.



2. ábra. (a) A Lorenz-modell: $dx/dt = \sigma(y-x)$, $dy/dt = x(\rho-z)-y$, $dz/dt = xy-\beta z$. Az ábrán látható trajektória a $\sigma = 10$, $\rho = 28$, $\beta = 8/3$ paramétereknek felel meg. (b) Az (a) panelen kirajzolt 2000 adatpontból álló trajektória visszatérési térképe. A pontosság (a körök sugara) $\varepsilon = 5$.

tén. A bal alsó sarokban látható kiterjedtebb sűrű rész a mozgás első szakaszában (bal oldali „pillangó szárny”) történő visszatéréseket mutatja, míg a jobb felső lazább szerkezetű textúra a „jobb szárny”, illetve a kettő közti átmeneteket reprezentálja. A piros és zöld szaggatott vonalak segítség a szemnek, hogy megállapíthassuk a visszatérések körülbelüli (i, j) helyét (lényegében az idejét).

Észrevehető, de a definícióból is következik, hogy a VT-k szimmetrikusak. Elegendő tehát csak a felső



3. ábra. Különböző rendszerek visszatérési térképei. Fent: gerjesztés nélküli sűrűlódásmentes harmonikus oszcillátor, csatolt harmonikus oszcillátorok (frekvenciaarány: 5/1,85), Lorenz-attraktor. Lent: [0; 1] intervallumba eső, egyenletes eloszlású zaj, Brown-mozgás, valamint lassan változó paraméterű logisztikus leképezés, $x_{t+1} = 4 x_t(1-x_t) - 0,0025 t$. Forrás: [10].

vagy alsó háromszöggel foglalkozni. A főátló (identikus vonal [line of identity]) mindig nem nulla elemeket tartalmaz. A teljesség igénye kedvéért itt jegyzem meg, hogy a 2.b ábra VT-én $\varepsilon = 5$.

A 2.b ábra VT-én feltűnhet, hogy vannak hosszabb-rövidebb átlós irányban húzódó vonalak, valamint kiterjedtebb „göcpontok”, amelyek szintén átlós struktúrából épülnek fel. Ezenkívül a már említett teljes hosszában jelen levő főátló, ami azt hivatott kifejezni, hogy a trajektória minden pillanatban önmaga ε sugarú környezetében van.

A kérdés az, hogy mit tanulhatunk ebből a kvalitatív képből a rendszer dinamikai viselkedését illetően. Ennek a megválaszolására érdemes megvizsgálni különféle mozgástípusokat és összehasonlítani azok VT-it.

A 3. ábrán merőben más rendszerekhez tartozó VT-eket láthatunk. Sorrendben: harmonikus oszcillátor, csatolt harmonikus oszcillátorok, Lorenz-attraktor (ugyanaz, mint a 2.b ábra), egyenletes eloszlású zaj, Brown-mozgás, valamint lassan változó paraméterű logisztikus leképezés.

A visszatérési térképek struktúráit globális és lokális jellemzőkre bonthatjuk. A 3. ábra felső sorában a diagonális jelleg dominál, míg a második sorban a pontok a homogén eloszlástól kezdve klaszterezettségen át egészen a főátló menti „szétfolyásig” mutatnak különféle viselkedést. Ez a diverzitás a VT-t generáló dinamika következménye. A hirtelen változások, illetve extrém események fehér területeket vagy sávokat

generálnak a VT-n (lásd alsó sor középső ábra). A lassú (adiabatikus) változás „kifehéríti” a térképek bal felső és jobb alsó sarkait (alsó sor jobb panel).

Közelebbről megnézve az első sor diagonálisai a mozgás rendezettségére utalnak. Szemben a második sort alkotó rendszerekkel. Egy átlós szegmens fázistérbeli megfeleltetése nem más, mint hogy a trajektória bizonyos ideig párhuzamosan fut saját magával, hiszen visszatér ε sugarú környezetébe. Minél hosszabbak az átlós vonalak a VT-n, annál párhuzamosabban haladnak a trajektória részei a fázistérben. Sőt a bal felső ábrán az átlós vonalak közti távolságból a harmonikus oszcillátor frekvenciáját is meg lehet határozni. Hasonlóképpen tehetünk a kváziperiodikus esetben is (felső sor közepe), bár ott a frekvenciák keveredése miatt azok szétválasztása kissé bonyolultabb feladat. Ebben az esetben az ismétlődő struktúra megmarad, de közel sem olyan példás, mint a tisztán harmonikus mozgás esetén. A kaotikus dinamika hatása az átlós szerkezetre jól megérthető. Nevezetesen a vonalak rövidülése. Ahogy fentebb láttuk, minél hosszabbak az átlós szegmensek, annál inkább párhuzamosan futnak a trajektória elemei. Instabil/kaotikus esetben a trajektória fázistérbeli szétartása exponenciális, így a diagonális szakaszok is rövidülnek. Minél gyorsabb a szétartás, annál ritkább a visszatérés. Ezzel el is érkeztünk jelen cikk egy fontos pontjához. Kapcsolatba hozható-e a VT-k szerkezete a mögöttes dinamikával?

Kvantitatív leírás

A visszatérési térképek számszerűsítése (az angol irodalomban recurrence quantification analysis – RQA) lényegében a kialakult struktúra statisztikus leírása [11]. Például a diagonális vonalak átlagos hossza; a visszatérési pontok aránya a térképen; azon pontok aránya, amelyek függőleges vonalat alkotnak stb. Ezek és ehhez hasonló mennyiségek együttes vizsgálatát tekintjük RQA-nak, azaz a visszatérési térképek mennyiségi leírásának, számszerűsítésének.

A teljesség igénye nélkül nézzünk most meg ezek közül néhányat.²

- Visszatérési ráta (recurrence rate – RR):

$$RR(\epsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}(\epsilon).$$

A visszatérési pontok sűrűsége a VT-n. Az RR természetesen függ az előre definiált visszatérési környezet ϵ méretétől.

- Átlagos diagonális vonalhossz:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P(l)}{\sum_{l=1}^N P(l)},$$

itt $P(l)$ az l hosszúságú diagonális szakaszok eloszlása. Az l hosszúságú átlós szakasz – ahogy már korábban láttuk – azt írja le, hogy a trajektória bizonyos részei l ideig párhuzamosan futnak. Így L két trajektóriarészlet egymáshoz való közelségének átlagos idejét méri, egyfajta átlagos előrejelzési időnek is tekinthető.

- Leghosszabb átlós vonal:

$$L_{\max} = \max\{l_i; i = 1, \dots, N_l\},$$

ahol

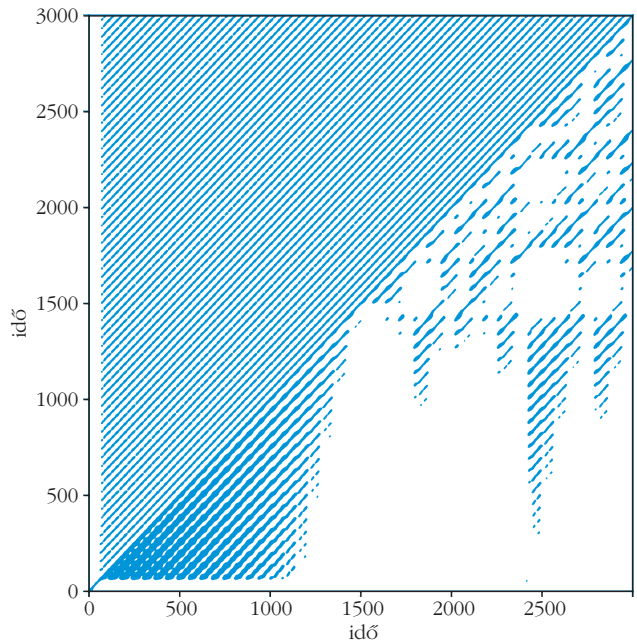
$$N_l = \sum_{l \geq l_{\min}} P(l)$$

a diagonális vonalak száma. Továbbá definiálhatjuk a divergenciát $DIV = 1/L_{\max}$. Ez a két mérőszám kapcsolatba hozható a fázistrajektória exponenciális szétartásával.³ Minél gyorsabb a szétartás, annál rövidebbek a diagonális szakaszok (gondoljunk a 3. ábra felső sorához mondottakra), illetve annál nagyobb DIV értéke.

A Lorenz-rendszer az alábbi paraméterekre periodikus megoldást ad: $\sigma = 10$, $\beta = 6$, $\rho = 168$. Az 1.a ábrához tartozó paraméterekre pedig a jól ismert kaotikus attraktort. A következőkben e két mozgáshoz tartozó RQA mérőszámokat gyűjtöm össze: periodikus pálya:

²Egy teljesebb kép kapható a lehetséges mérőszámokról Marwan és munkatársai cikkében [10].

³Meg kell azonban jegyezni, hogy nem feleltethető meg egy az egyben a Lyapunov-kitevőnek.



4. ábra. A felső háromszögmátrix a periodikus megoldás VT-je, míg az alsó a kaotikus mozgásé. Ebben a szimulációban 10 000 pontból áll a trajektória és ennek egy részlete ($t = 3000$ -ig) látható az ábrán. A bal alsó sarokban $t \approx 100$ időegységig tartó rövid főátló a dinamika tranzienzi kezdeti szakaszát mutatja, amíg a trajektória eléri az attraktort.

$L = 3770,82$; $DIV = 10^{-4}$; kaotikus attraktort: $L = 212,56$; $DIV = 7,61 \cdot 10^{-4}$. A 4. ábrán a reguláris és kaotikus mozgáshoz tartozó VT-eket láthatjuk egy mátrixban ábrázolva az összehasonlítás végett.

Beágyazás

Láttuk, hogy a VT-k viszonylag könnyen megkaphatók a fázistrajektória ismeretében. Mindemellett tudjuk a textúrát, ezzel kvantitatívan is le tudjuk írni a dinamikát. Legálabbis képesek vagyunk megkülönböztetni a minőségi különbségeket úgy, mint reguláris-kaotikus mozgás. Kicsit közelebbről a valósághoz elmondhatjuk, hogy egy adott dinamikai rendszerben nem mindig tudjuk az állapotvektor összes komponensét meghatározni. Nem beszélve arról, hogy az esetek nagy részében még a modellt leíró egyenleteket sem ismerjük pontosan.

Maradva a Lorenz-rendszerrel, gondolat kísérletként tegyük fel, hogy csak az x koordinátát tudjuk mérni valamilyen kísérletben. Ebből a skalár idősből szeretnénk a dinamikára következtetni. Kézenfekvő dolog a fentiekből, hogy valamilyen formában egy VT-t kellene legyártani. Hogyan lehet ezt megtenni, ha nem ismerjük a fennmaradó másik két koordinátát, azaz nincs meg a teljes fázistrajektória, hanem annak csak egy komponense?

Ebben az esetben jöhet segítségünkre Takens beágyazási tétele [12]. Elégedjünk most meg azzal, hogy szavakban megfogalmazzuk és egy szemléletes képpel alátámasztjuk a módszert. Az időeltolások beágyazás a dinamikai rendszerekben lehetővé teszi, hogy

rekonstruáljuk a fázistérbeli attraktort pusztán a megfigyelésből/mérésből kapott adatsor alapján. Az állapot visszafejtése megtartja a rendszer dinamikai tulajdonságait, azonban a geometria eltérhet az eredeti fázistérszerkezettől.

Az időeltolásos beágyazásnál két paramétert kell lerögzíteni: (i) az időlépést, amivel az adatsort eltoljuk önmagához képest; (ii) a dimenziószámot, amibe a rekonstruált trajektóriát vissza kívánjuk állítani. Az $x(t_i)$ ($i = 1, \dots, n$) idősor egy adott x skalár fizikai mennyiség diszkrét Δt időben vett sorozata, amely függ a rendszer állapotától $x(t_i) = \mathbf{s}(\mathbf{s}(n\Delta t))$, ahol \mathbf{s} a fázistrajektória. Az m dimenziós térbe ágyazott vektor a következő

$$\mathbf{x}_N = \left\{ x(t_i - (m-1)\tau), x(t_i - (m-2)\tau), \dots, x(t_i - \tau), x(t_i) \right\},$$

ahol $i = 1 \dots n$ az eredeti jel hossza, m a tér dimenziója, amelybe a rekonstruált fázisvektort beágyazzuk, τ pedig az \mathbf{x}_N vektor szomszédos komponensei közti időkülönbség.

Az időeltolásos módszer tehát egy skalár idősor reprezentációját adja egy magasabb dimenziós beágyazási térben. E technika előnye, hogy egy az egyben megfeleltetését adja az eredeti (több dimenziós) \mathbf{s} állapotvektornak.

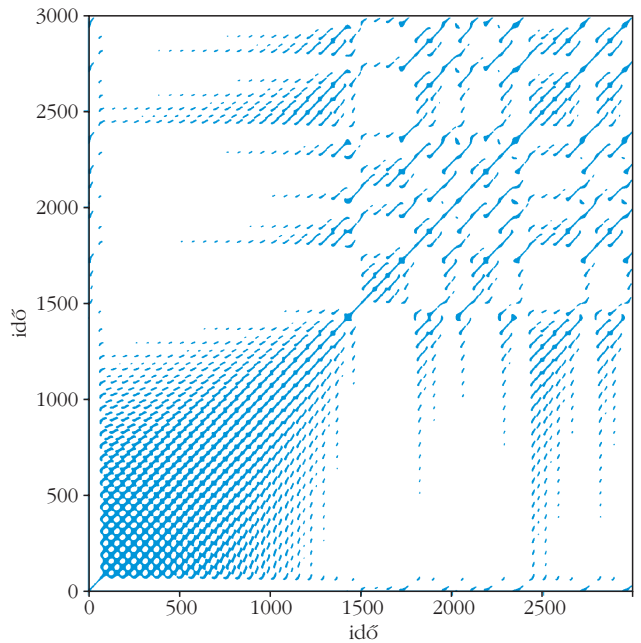
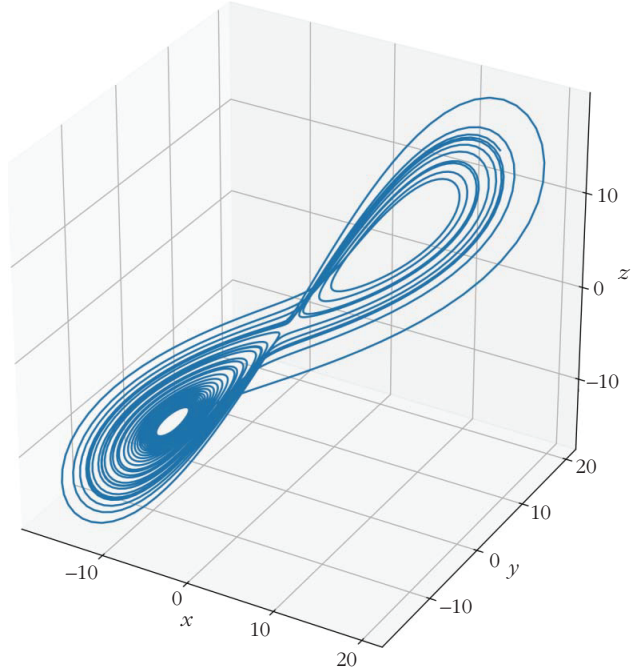
Az időeltolásos beágyazást követően az \mathbf{x}_N vektor első oszlopának hossza $N = n - (m-1)\tau$. A dimenziószámot is figyelembe véve \mathbf{x}_N nem más, mint egy $m \times [n - (m-1)\tau]$ mátrix. A visszaállított állapotvektor komponensei pedig az eredeti 1D jel τ idővel eltoltszakaszai. A tisztánlátás kedvéért nézzünk egy légből kapott példát!

Vegyünk egy skalár adatsort 600 ponttal:

$$x(t_i) = \begin{pmatrix} \#1 \\ \#2 \\ \vdots \\ \#599 \\ \#600 \end{pmatrix}, \quad i = 1 \dots 600.$$

Majd válasszuk meg a beágyazási paramétereket, legyen például, $m = 3$, $\tau = 4$. Ennek következtében a helyreállított fázistrajektória mérete 3×592 :

$$\mathbf{x}_N = \left\{ x(t_i - 2 \cdot 4), x(t_i - 4), x(t_i) \right\} = \begin{pmatrix} \#9 & \#5 & \#1 \\ \#10 & \#6 & \#2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \#599 & \#595 & \#591 \\ \#600 & \#596 & \#592 \\ & \vdots & \vdots \\ & \#600 & \vdots \\ & & \#600 \end{pmatrix}.$$



5. ábra. Fent: rekonstruált Lorenz-attraktor az eredeti trajektória x komponensének felhasználásával. Geometriai tulajdonságaiban eltér az eredetitől, de a dinamikai jellemzőket megtartja. A beágyazási paraméterek a főszövegben vannak részletezve. Lent: a rekonstruált trajektóriához tartozó VT. Jó az egyezés a 2. ábrával.

Az első legrövidebb oszlop elemein túlnyúló pontokat a további oszlopokból elhagyjuk. Vegyük észre, hogy így az utolsó oszlop maga az eredeti idősor egy csonkított része. Ezzel a módszerrel visszaállított trajektória pontjai az adott \mathbf{x}_N vektor soraiból származnak, azaz esetünkben a fázistrajektória első pontja az eredeti idősor (#9, #5, #1) adatpontjaiból épül fel. Ennek megfelelően ábrázolható is a rekonstruált trajektória (amennyiben $m \leq 3$).

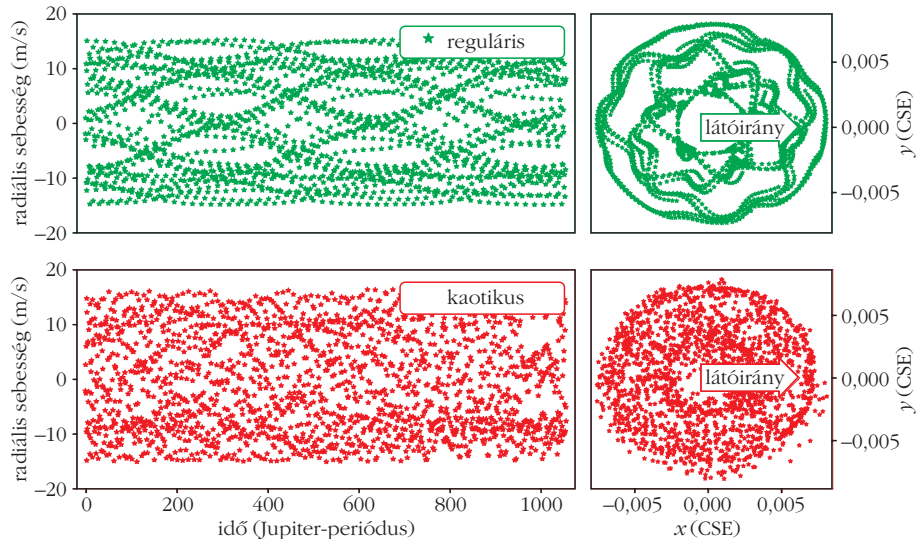
Visszanyúlva az eddig is jól bevált Lorenz-attraktorhoz, nézzük meg miként fest, ha azt a modell x koor-

dinátájából fejtjük vissza $m = 3$, $\tau = 4$ paraméterekkel. Az 5. ábrán a rekonstruált attraktort láthatjuk, amely jellegében hasonlít az eredeti, numerikus megoldásból kapott halmazhoz, azonban nem tökéletesen ugyanaz. Kimutatható viszont, hogy a rendszerre jellemző dinamikai tulajdonságok (fraktáldimenzió, Lyapunov-kitevő, topologikus entrópia) megegyeznek az eredeti rendszerben kapott mennyiségekkel. Természetesen a visszaállított fázisrajtória függ az időeltolások beágyazás paramétereitől, és ennek megfelelően nem mindig szolgáltatja a kellő dinamikai hátteret. A megfelelő m és τ értékek meghatározására több eljárás ismert az irodalomban [13]. Továbbá érdemes megjegyezni, hogy a fázistér rekonstrukciójára is vannak alternatívák, amelyek Takens beágyazási tételéhez hasonlóan elterjedt módszernek számítanak [14]. Ha megtörtént a beágyazás és a skalár idősorból megkaptuk a fázisrajtóriát, alkalmazhatjuk a visszatérési térképeket és az RQA-t.

Alkalmazás

Az eddigiekben képet kaptunk a Poincaré-féle visszatérések alapvető mechanizmusáról, valamint skalár idősorokból való visszafejtésének lehetőségéről. A következőkben a cikk címéhez hűen néhány alkalmazásról esik szó. A tudományos vonalat ebben az esetben a bolygómozgás dinamikai vizsgálata képviseli idősorokon alapuló VT-k segítségével. A művészeti ág pedig textil szötteken megjelenített pulzus és vérnyomásadatokat foglal magába.

Az extraszoláris bolygórendszerek tanulmányozása javarészt indirekt módon történik, azaz a központi csillagról érkező fény, illetve annak időbeli változása hordozza a körülötte keringő bolygó(k) fizikai tulajdonságait, beleértve a létezésüket is.⁴ Két fő módszer adja a ma ismert naprendszeren kívüli bolygók több mint 90%-át. A radiális (látóirányú) sebességmérés (i) során a központi égitest spektrumában a vonalak eltolódását használják fel a látóirányú mozgás meghatározására. Amennyiben bolygó kering a csillag körül, úgy a spektrumvonalak periodikusan a kék, illetve a vörös felé tolódnak el attól függően, hogy a pálya mely szakaszát monitorozzuk éppen. Az így kapott sebességadatokból a bolygó tömegére tehetünk felső becslést. A fedési módszer (ii) lényege, hogy a rend-



6. ábra. Balra: a Nap radiális sebessége (v_x sebességkomponens) a Nap–Jupiter–Szaturnusz tömegközépponti rendszerben reguláris (zöld) és kaotikus (piros) viselkedés esetén. A görbék nem folytonosak, mert a numerikus integrálásból keringésenként egy-egy adatpontot tartottam meg, ezzel is érzékeltetve, hogy a csillagászati megfigyelés sem folytonosan történik. Jobbra: a Nap tömegközéppont $(x, y) = (0, 0)$ körüli mozgása a két óriásbolygó hatására. Valós exobolygórendszer esetén a látóirány (x tengely) felől az x - y síkban nézünk rá a rendszerre és végezzük a mérést.

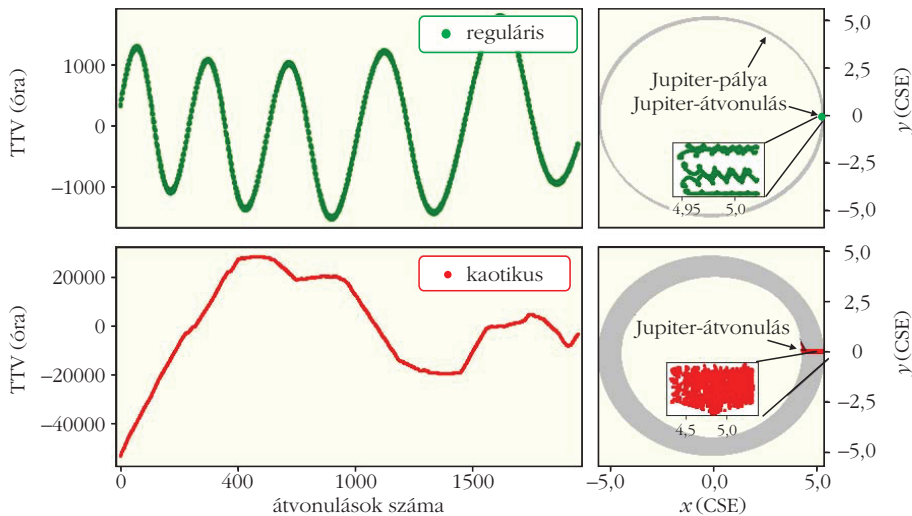
szere a keringés síkjában látunk rá, így a bolygó szabályos időközönként kitararja a csillagról érkező fény egy részét. Mindkét módszer működik többes rendszer esetén is. Amennyiben egynél több bolygó kering a központi csillag körül a köztük lévő kölcsönös tömegvonzás „elrontja” a Kepler-pályából következő periodikus kitararásokat, így az egymást követő fedések időpontja változik. Ezt a jelenséget nevezzük tranzitidő-változásnak (az angol rövidítésből TTV-nek).

A közelmúltban leírtam egy szócikkben [15], hogy a radiális sebességmérésekre vagy a TTV mérésekre támaszkodva kimutatható egy bolygórendszer stabilitása. Ez egy merőben új megközelítése az eddigi direkt, azaz numerikus szimulációkon alapuló leírás módnak. Ez utóbbiban – ahogy megszokhattuk a kezdőfeltételek ismeretében – a mozgásegyenleteket számítógép segítségével oldjuk meg, így rendelkezésre áll a fázisrajtória. Majd ezek alapján elvégezhető a stabilitásvizsgálat. Ezzel szemben a mérési adatokra épülő módszerben a dinamikát leíró egyenletekre sincs szükség és ezáltal a kezdőfeltételek is elhagyhatók.

Annak érdekében, hogy legyen csillagászati mérésekre hasonlító adatsorunk, válasszuk a vizsgált képzetelbeli exobolygórendszernek a Nap–Jupiter–Szaturnusz alkotta gravitációs háromtestproblémát. Számítógéppel ezt könnyen tudjuk szimulálni, valamint különféle dinamikai viselkedést is megfigyelhetünk adott kezdőfeltételek esetén. Egy további megkötés még, hogy a számolásban a két bolygó egy síkban kering, ami jó közelítés, de a valóságban nem teljesül. Mint ismeretes a két óriásbolygó jelenlegi helyzete speciális, mert a Nap körüli keringési idejük aránya 5:3.⁵ Ez hosz-

⁴Direkt megfigyeléssel is fedeznek fel exobolygókat, de ez a módszer jóval kevesebb jelöltet állít az effektívebb eljárásokhoz képest.

⁵A Jupiter 5,2 és a Szaturnusz 9,6 csillagászati egységre kering a Naptól. *Kepler* III. törvénye alapján a keringési idejük aránya így közel 5:3.

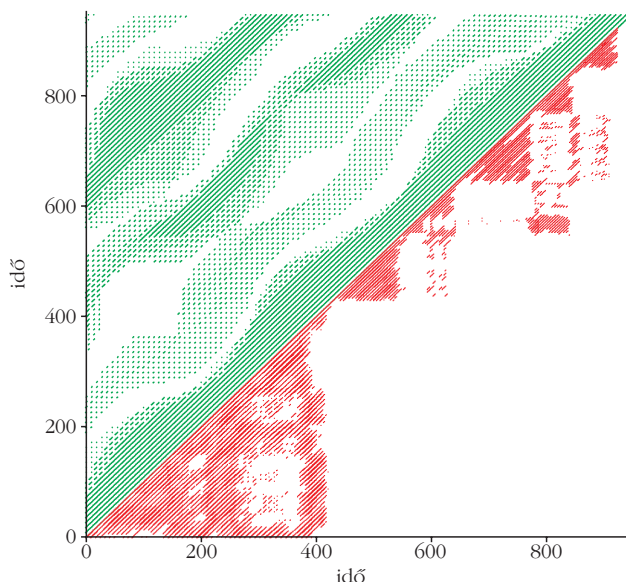


7. ábra. Balra: a Jupiter tranzitidő-változása, amelyet az $y = 0$ és $v_y > 0$ feltétellel definiálunk. A színek a 6. ábrának megfelelőek. Jobbra: az átvonulások pozíciója a látóirány mentén. Kaotikus esetben a Jupiter pályájának sugara jóval tágabb tartományban változik, $4,3 < a < 5,3$ CSE.

szűtávon egy stabil rezonáns konfigurációt ad. Gondolatban persze meg lehet változtatni, mondjuk a Szaturnusz pályáját oly módon, hogy közelebb legyen a Naphoz és az excentricitása kellően nagyra váljon, például $(a, e) = (7,2, 0,2)$, ahol a a Szaturnusz fél-nagytengelye, e pedig pályalapultsága. Ezekkel az adatokkal a rendszer dinamikai viselkedése már kaotikus. Numerikus integrálással bármilyen adat kinyerhető tetszőleges viselkedés esetén, ezt használjuk ki a következőkben.

A 6. ábrán ebben a hipotetikus exobolygórendszerben láthatjuk a Nap x irányba eső sebességét két esetben, zölden a jelenlegi konfigurációban, pirossal pedig a fent említett módosított Szaturnusz-pályával. A számolás valamivel több mint 1000 Jupiter-periódusra (körülbelül 12 500 év) lett számolva, ami már megbízható dinamikai időskála. Ez a radiális (látóirányú) sebesség idősor az alapja a VT-k készítésének és

8. ábra. A 6. ábrán látható RV idősorokhoz tartozó visszatérési térképek. (Felső háromszög reguláris dinamika, alsó kaotikus.)

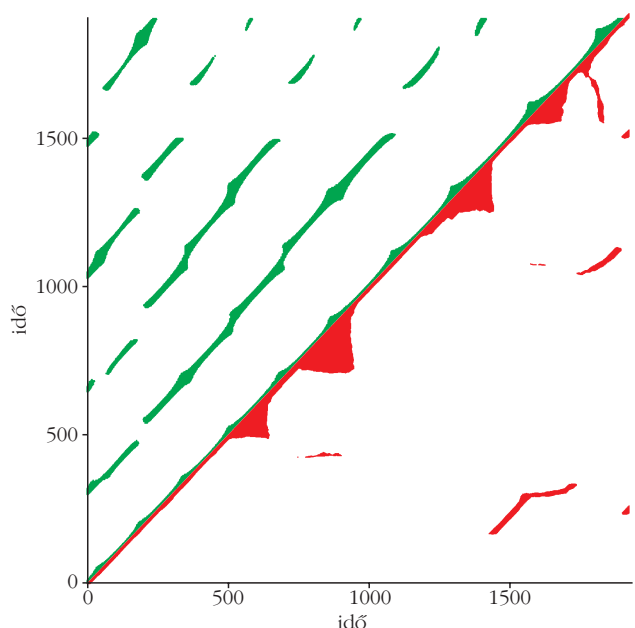


az azokon definiált mérőszámok meghatározásának. A 7. ábrán az előzőekkel megegyező dinamikai viselkedés mellett rögzítjük a Jupiter Nap előtti átvonulásának tranzitidő-változását. Hasonlóan az RV esethez, itt is megkülönböztetünk két mozgástípust: regulárist és kaotikust (zöld/piros). Szintén e két TTV adatsor lesz a visszatérési térképek bemenete.

A fent említett mozgástípusokhoz és mért mennyiségekhez tartozó VT-k láthatók a 8. és 9. ábrákon a megfelelő színekben. Mindkét esetben azt láthatjuk, amit már a Lorenz-modellnél megtanultunk, a reguláris dinamika

hosszabb összefüggő átlós szerkezetet eredményez szemben a kaotikussal. Mindkét mérés esetén visszafejthető a dinamika pusztán skalár idősből. A két térkép közti különbség természetesen a mért mennyiségekből (RV és TTV) ered. Gondoljuk meg, a Nap x sebességkomponense a rendszer fázisrajtóriaíjának egzaktul egyik komponense, míg a tranzitidő követése a rendszer diszkrét időközönkénti monitorozása, bizonyos feltételek teljesülése esetén. A visszatérési térképek és azok kvantitatív leírása tehát lehetővé teszi, hogy eldöntsük egy három égitestből álló egyszerű dinamikai rendszer viselkedését. Vegyük észre továbbá, hogy nem használtuk ki a rendszert leíró egyenleteket, nem ismertek a paraméterek (tömegek) sem, illetve kezdőfeltételeket sem adtunk

9. ábra. A 7. ábrán látható TTV idősorokhoz tartozó visszatérési térképek.



meg. Pusztán „belemértünk” a rendszerbe és az így rendelkezésre álló adatsort használtuk fel.

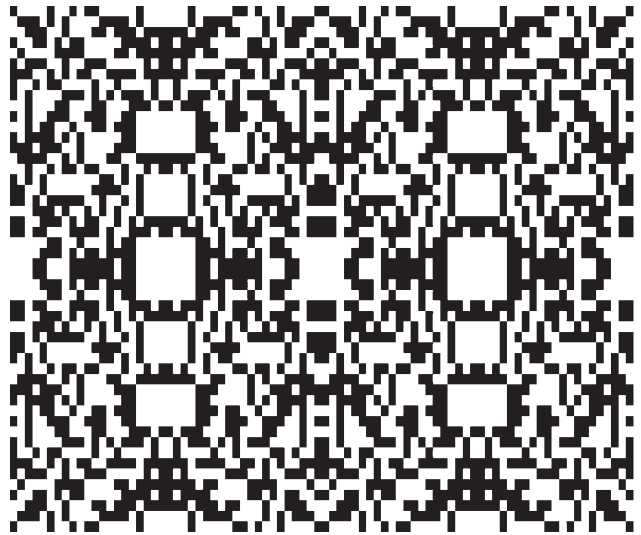
Érdeemes megemlíteni, hogy a módszer működik mérési zaj (10% – 15%) és a megfigyelést imitáló hiányzó adatpontok figyelembevételével is (maximum 20%-ra tesztelve). Természetesen ebben a realiztikus esetben a kétfajta dinamikai viselkedés közti markáns különbség kisebb, de még mindig jól szám-szerűsíthető.

A dinamikai rendszerek elemzése fázistérbeli visszatérésekkel igen elterjedt az utóbbi évtizedekben. Alacsonydimenziós nemlineáris modellek idősorainak megbízható analízisét szolgálja a legkülönbélebb tudományterületeken, ahol a dinamikai tulajdonságot mérési adatsorokon keresztül lehet tanulmányozni (EKG, időjárás adatok, pénzügyi idősorok, napfolt aktivitás stb. [16–19]).

Záró momentumként megemlítem, hogy a magyar kortárs művészetben is „felfedezték” az idősorokon alapuló bináris mátrix megjelenítést. *Baráth Hajnal*, a Budapesti Metropolitan Egyetem tanára (Divat és Textil Tanszék), valamint hallgatója, *Takács Gabriella* egy projektjükben a szövetszerkezet és a kétváltozós logikai függvényekkel megjeleníthető struktúrák közti párhuzamot tanulmányozták. Bináris formában felírt vérnyomás- és pulzusadatokat kombináltak az MS Excel kínálta logikai függvényekkel (például kizáró vagy) és a kapott nullákból és egyesekből álló mátrixot jelenítették meg (10. ábra). Habár az idősorok beágyazását és fázistérbeli visszatéréseket nem vették figyelembe, de felismerték a munka interdiszciplináris jellegét és a különböző tudományterületek művészekkel való kapcsolatát [20].

Kitekintés

A visszatérési térképek a megfigyelt idősorokon alapulnak. Ennek megfelelően az egymást követő mérési pontok időbeli sorrendje vitathatatlan és a dinamikai rendszerre jellemző. Ahogy láttuk VT-k bináris mátrixok. Kis képzelőerővel ezek az objektumok elképzelhetők, mint komplex hálózatok szomszédsági mátrixai. A hálózat csúcsai a rekonstruált fázisrajtória pontjai, a köztük lévő kapcsolatok a visszatérésekkel definiáltak. Azaz a VT-k nem nulla pontjai a hálózati kapcsolatokat reprezentálják, az üres részek a kapcsolatok nélküli helyeket jelölik (a fázisrajtória azon részei, amelyek nem térnek vissza egymás közelébe). Az így kapott szomszédsági mátrixon meghatározhatunk jól ismert mérőszámokat, amelyek a hálózat reprezentálására használt gráf topológiai tulajdonságait írja le (átlagos legrövidebb úthossz, átlagos fokszám, klaszterezettség stb.). Kimutatható, hogy ezek a mérőszámok szintén kapcsolatban vannak a rendszer dinamikájával. Másképp megfogalmazva, a mérési adatsort egy komplex hálózatot reprezentáló gráffá alakítjuk, amelynek kvantitatív tulajdonságai a dinamikai rendszer jellemzői. Ennek egy fontos következménye, hogy a mért idősor pontjainak sorrend-



10. ábra. Vérnyomás- és pulzusadatokból felépülő bináris textil-minta [20].

je a gráfban már nem számít, csak a topológia. Ilyen formában a dinamikai rendszerek merőben más nézőpontból tanulmányozhatók a jövőben.

Irodalom

1. Simon L. P.: *Differenciálegyenletek és dinamikai rendszerek*. Egyetemi jegyzet, ELTE Matematikai Intézet (2012) web: <https://simonp.web.elte.hu/files/dinrendjegyzet.pdf>
2. Gruiz M., Tél T.: A káosz. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 191.
3. Gruiz M., Tél T.: Káoszról, kicsit bővebben. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 218.
4. Gleick, J.: *Káosz, egy új tudomány születése*. Göncöl Kiadó, Budapest, 1999.
5. Tél T., Gruiz M.: *Kaotikus dinamika*. 1. kiadás. Universitas Kiadó, 2002.
6. Diacu, F., Holmes, P.: *Égi találkozások, A káosz és a stabilitás eredete*. Akkord Kiadó, Budapest, 2003.
7. Érdi B.: *A Naprendszer dinamikája*. Eötvös Kiadó, Budapest, 2001.
8. Altmann, E. G., Tél, T.: Poincaré recurrences from the perspective of transient chaos. *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 174101.
9. Eckmann, J. P., Kamphorst, S. O., Ruelle, D.: Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters* 5 (1987) 973.
10. Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., Kurths, J.: Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems. *Physics Reports* 438 (2007) 237.
11. Zbilut, J. P., Webber Jr., C. L.: Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics Letters A* 171 (1992) 199.
12. Kantz, H., Schreiber, T.: *Nonlinear time series analysis*. 2. kiadás. Cambridge Univ. Press, 2003.
13. Semmlow, J. L., Griffen, B.: *Biosignals and medical image processing*. 3. kiadás. Taylor & Francis Group, 2014.
14. Hirata, Y., Aihara, K.: Dimensionless embedding for nonlinear time series analysis. *Physical Review E* 96 (2017) 032219.
15. Kovács, T.: Stability of exoplanetary systems retrieved from scalar time series. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 491 (2020) 3137.
16. Kachhara, S., Ambika, G.: Bimodality and scaling in recurrence networks from ECG data. *Europhysics Letters* 127 (2019) 60004.
17. Faranda, D., Messori, G., Yiou, P.: Diagnosing concurrent drivers of weather extremes: application to warm and cold days in North America. *Climate Dynamics* 54 (2020) 2187.
18. Antoniou, A., Vorlow, C. E.: Recurrence quantification analysis of wavelet pre-filtered index returns. *Physica A* 344 (2004) 257.
19. Li, K. J., Gao, P. X., Zhan, L. S.: Synchronization of Sunspot Numbers and Sunspot Areas. *Solar Physics* 255 (2009) 289.
20. Baráth H.: Bináris rendszerek alkalmazása a kortárs textiltervezésben. *Művészet és pedagógia* 2 (2018) 48.

TÖKÉLETLEN HOLOGRÁFIA

A hologramok pontatlan rekonstrukciójából eredő geometriai optikai aberrációk

Bányász István

Wigner FK, Nukleáris Anyagtudományi Osztály

Ez a cikk azon eredmények rövid bemutatása, amelyeket a szerző pontforrások nagy numerikus apertúrájú hologramokról rekonstruált valódi képének vizsgálatával ért el. A korábbi holográfiai munkákhoz hasonlóan a pontforráshologramok geometriai optikai aberrációit egyszerű analitikus függvényekkel határoztuk meg. A számítások szerint, ha a rekonstruáló nyaláb beesési szöge akár csak nagyon kis mértékben (mrad) eltér a referencianyaláb konjugáltjától, akkor már jelentős geometriai optikai aberrációk lesznek a rekonstruált képben. Az elméleti eredményeket módosított Hartmann-tesztekkel ellenőriztük. A hologramok 632,8 nm hullámhosszú He-Ne lézerral lettek felvéve, egy kollimált referencianyalábbal és egy 0,85 numerikus apertúrájú mikroszkópobjektívvel előállított kvázi szférikus tárgynyalábbal. A hologramlemez mérete 60 mm × 90 mm volt. A referencianyaláb beesési szöge 22,5° volt, és a pontforrást a hologram középpontjával összekötő egyenes -22,5°-ot zárt be a hologram normálisával, a két pont távolsága pedig 90 mm volt. A módosított Hartmann-tesztek eredményei 0,5 mrad rekonstruálási szöghiba felett nagyon jól megegyeztek a számítások eredményeivel. Ennél kisebb szöghibák esetében az aberrációkat már a diffrakció figyelembevételével kell kiszámítani.

Bevezetés

Hosszú szünet után követi ez a cikk a szerző első publikációját e témában a *Fizikai Szemlében* [1]. Ráadásul – az amerikai blockbusterek rossz szokását követve – egy későbbi fejezetet követ az, amelyeknek az elsőnek kellett volna lennie.

Az csillebérci ős pontforrás története 1982-re nyúlik vissza, amikor *Varga Péter* a KFKI Mikroelektronikai Kutatóintézetében (MKI) kiírta *A hullámfront holografikus megfordítása* című diplomamunkát, és felvette jelen cikk szerzőjét diplomamunkásnak. Ez a kutatási téma akkor azért volt időszerű, mert a mikro-

elektronikában egyrészt keresték annak a lehetőségét, hogy növeljék a (vetítéses) fotolitográfia feloldóképességét, másrészt kiváltsák a bonyolult és drága step-and-repeat kamerákat [2]. Nem voltam könnyű helyzetben, mert ezt a kutatási témát akkor nemcsak Magyarországon, hanem a világban sem művelték. Vagyis „semmitől egy új (sic) más világot” kellett teremtenem. De ki vagyok én, hogy *Bolyai János*hoz hasonlítom magamat? Egyébként is már idősebb, 23 éves voltam a diplomamunka megkezdésekor.

A holografikus leképezés számszerű jellemzésére a kezdetektől a mai napig szükség van. Ha a hologram rekonstruálása a felvételi hullámhossztól eltérő hullámhosszon történik, akkor mindig fellépnek aberrációk. Ennek „enyhébb” formájára jó példa a rubin impulzuslézerral ($\lambda = 694,3$ nm) rögzített hologram rekonstruálása He-Ne lézerral ($\lambda = 632,8$ nm). A röntgenholográfia kezdetei még a lézerek feltalálása előtti időkre nyúlnak vissza. Ebben az esetben is nagyon fontos, hogy a hullámhosszváltásból eredő aberrációkat kezelni tudják [3]. A holografikus optikai elemek (HOE) tervezéséhez is fel kell használni a diffrakciós integrálokat [4]. Míg a klasszikus hologramok két nyaláb interferenciaképének rögzítésével létrejövő diffraktív optikai elemek, addig a HOE-k egy *számított* interferenciakép mikroelektronikai technikával történő megvalósításai. A digitális holografikus mikroszkópiában a hologramot CCD- vagy CMOS-érzékelőn rögzítik, és *numerikusan* rekonstruálják. Tehát a digitális hologramok rekonstruálásához elengedhetetlen a diffrakciós integrálok numerikus kiszámítása (számítógéppel) [5]. A digitális holográfiát széles körben használják, például az orvosi és biológiai kutatásokban és gyakorlatban [6]. A holografikus memóriák tervezéséhez is elengedhetetlen a holografikus leképezés numerikus számítása. Ez a terület jelenleg sokadik reneszánszát éli [7]. Utoljára hagytam a számítógéppel generált holografikus optikai elemek egyik legnépszerűbb alkalmazását: a légi és szárazföldi közlekedésben alkalmazott holografikus kijelzőket [8].

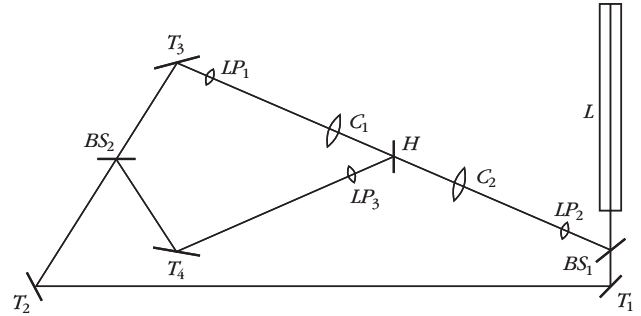
Nagyon alapos szakirodalmi kutatások után csak *Levenson* és szerzőtársai munkáit találtam a vetítéses fotolitográfia holografikus megvalósításáról [9]. Ők azonban nem hagyományos holográfiát használtak, hanem a (degenerált, vagyis egy hullámhosszú) négyhullámkeverést (four-wave mixing) [10, 11]. Nemlineáris optikai kristályban két egymással szemben haladó pumpáló fénynyaláb és egy tárgynyaláb kölcsönhatásának eredményeképpen létrejön a tárgynyaláb konjugáltja (a negyedik hullám), amely a tárgynyalábbal megegyező hullámfrontú, de azzal ellenté-



Bányász István 1983-ban végezte el az ELTE fizikus szakát. Ugyanott 1987-ben szerezte meg egyetemi doktori címét. 1994-ben a fizikai tudomány kandidátusa lett. 35 éve dolgozik az optika különböző területein. Jelenlegi kutatási területei: ionnyalábos technológiákkal készített integrált optikai elemek tervezése, készítése, minősítése és ionolumineszcencia. Az ELFT régi tagja, az SPIE nemzetközi optikai mérnöki társaság első magyar szenior tagja. Több mint húsz éve számos rangos nemzetközi folyóirat bírálója.

tes irányban terjed. Így lehet vetíteni a tárgy valós képét a megfelelő helyre (például a fotorezisztel bevont szeletra). Mindez mintegy valós időben történik. Ezt a technikát valós idejű holográfiának is nevezik.

Az MKI-ban egy világszínvonalú klasszikus holográfiai laboratóriumot kaptam hitbizományba témavezetőmtől, az addigra már lecsengett holografikus optikai memória kutatások hagyatékaként. Kézenfekvő volt, hogy a kitűzött célt a rendelkezésekre álló eszközökkel, klasszikus holográfiával próbáljam megvalósítani. Ennek természetesen voltak hátrányai is, de hatalmas előnye az volt, hogy a klasszikus holográfia – jó kezekben – nagyon jól kontrollálható, precíz eljárás is lehet. Éppen ezt bizonyítottam be diplomamunkásként és később pályafutásom első 15 évében.

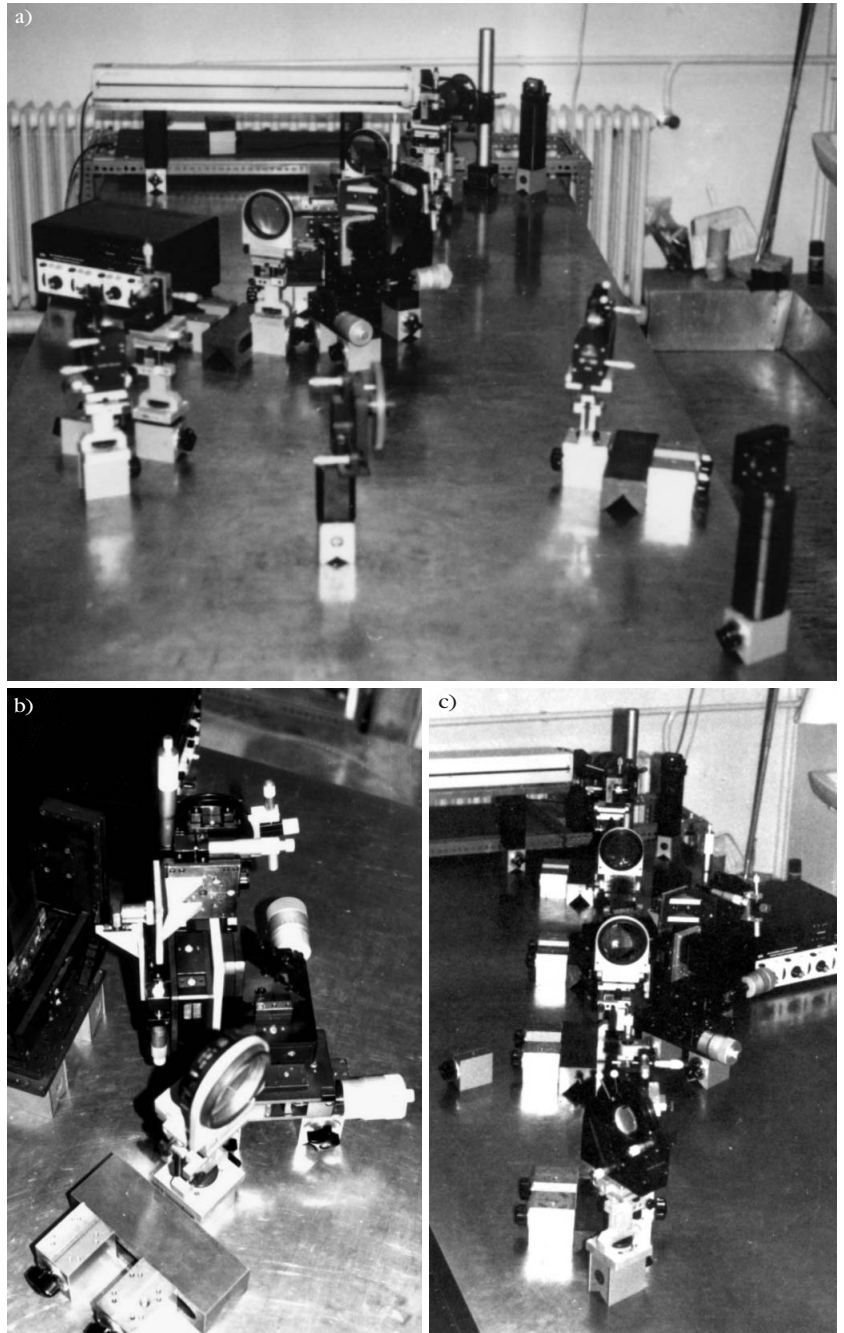


1. ábra. A pontforráshologramok felvételére és rekonstruálására szolgáló kísérleti összeállítás.

2. ábra. a) A kísérleti összeállítás fényképe. b) A tárgyforrás és a hologram. c) A két nyalábtágító teleszkóp.

A kísérleti összeállítás

A kísérleti összeállítás elrendezése az 1. ábrán látható. Az L lézer Spectra Physics 124B hélium-neon lézer ($\lambda = 632,8$ nm) az asztal síkjára merőlegesen polarizált, teljesítménye 18 mW. A nyalábok vezetésére és osztására a $T_1 \dots T_4$ tükrök és a BS_1 és BS_2 nyalábosztók szolgálnak. A BS_2 nyalábosztóról és a T_3 tükörről visszaverődő nyaláb szolgáltatja a referencianyalábot. Az LP_1 (lencse + térszűrő) egy 20 \times nagyítású mikroszkópobjektívából és a fókuszpontjában elhelyezett 25 μm átmérőjű tűlyukból áll. Az LP_1 által előállított tisztított divergens nyalábot a mikroszkópobjektívval konfokális C_1 precíziós csillagászati objektív ($f = 500$ mm) párhuzamosítja. A kollimált nyaláb sík hullámfrontját nyíró interferenciával, egy nagyméretű síkpárhuzamos lemez segítségével állítottuk be. A tárgynyalábként szolgáló pontforrást a BS_2 -ről és a T_4 -ről visszaverődő nyalábra helyezett 60 \times mikroszkópobjektív és a fókuszpontjában elhelyezett 25 μm átmérőjű tűlyuk hozta létre. Mivel a rekonstruált valódi holografikus képet akartuk tanulmányozni, a hologramot a referencianyaláb konjugáltjával kellett rekonstruálni. A rekonstruáló nyaláb a referencianyalábban pontosan szemben haladó kollimált nyaláb, amelyet a referencianyalábot előállító nyalábtágítóval azonos kollimátor ($LP_2 - C_2$) hoz létre. A H hologramlemez, Agfa-Gevaert 8E75HD, egy Eisler-féle precíziós holografikus tartóban helyezkedett el.



A teljes összeállítás fényképe a 2.a ábrán, a tárgyforrás és a hologram a 2.b ábrán és a nyálbtágító teleszkópok a 2.c ábrán láthatók. A kísérleti összeállítást egy Newport gyártmányú rezgésmentes optikai asztalon építettem fel. Az egyes optikai elemek beállítását nagy pontossággal és reprodukálhatóan végeztem el. A 2.b ábra jobb oldalán látható két transzlátor (vastag, ezüstös hengerek) felbontása például $0,2\ \mu\text{m}$ volt. A hologram szöghelyzetét finomrotátorral lehetett változtatni, és egy mérőórával ellenőrizni. A két teleszkóp egytengelyűségét olyan pontosan sikerült biztosítani, hogy az egyikből kijövő nyáláb a másikon áthaladt (a túlyukon is). A pontforrás rekonstruált valódi képének vizsgálatára több módszert dolgoztam ki. Ezekről később lesz szó.

A hologramok geometriai optikai aberrációinak kiszámítása

A hologramok látszólag a legjobb optikai elemek, ha nagy térbeli feloldóképességre van szükség nagy tárgytérben, mint például a holografikus mikroszkópiában, a buborékkamra-holográfiában vagy éppen a holografikus fotolitográfiában. A hologramok feloldóképességét elsősorban a véges hullámhossz és a numerikus apertúra korlátozza. Amint az elsődleges diffrakciós határhoz közeledünk, a holografikus rögzítőanyag véges feloldóképessége további korlátokat szab a leképezésben [12]. A holografikus rögzítőanyag vastagságváltozásai (shrinkage) magasabb térfrekvenciákon a diffrakciós hatásfok helyfüggő csökkenését, és végső fokon a rekonstruált kép torzulását okozzák [13]. Ezekon kívül még több olyan gyakorlati tényező van, amely megakadályozza az elméleti leképezési határok elérését.

A klasszikus holografikus mikroszkópia esetében az aberrációk megjelenése nyilvánvaló, mivel a se-

gédnyalábok (referencia- és rekonstruáló nyáláb) szférikusak és különböző görbületűek, így egy pontforrás rekonstruált hullámfrontjában ugyanolyan hibák lesznek mint egy gömbi lencse kimenő hullámfrontjában [14, 15]. A holografikus fotolitográfia esetében sík (kollimált) segédnyalábokra van szükség. Ha a rekonstruáló nyáláb iránya csak egy kis szöggel is eltér a referencianyáláb konjugáltjától, vagy a hologram előhívás után nem az eredeti helyzetébe kerül vissza, akkor a tárgynyáláb rekonstruált hullámfrontja torzulni fog. E munka célja az volt, hogy ezeket az összefüggéseket meghatározzuk. Nagyobb szögeltérések ($0,5$ mrad felett) esetében a rekonstruált kép mikrofotóinak mérése elegendőnek bizonyult, de kisebb szöghibák esetében a rekonstruált képet közvetlenül szkenneltük.

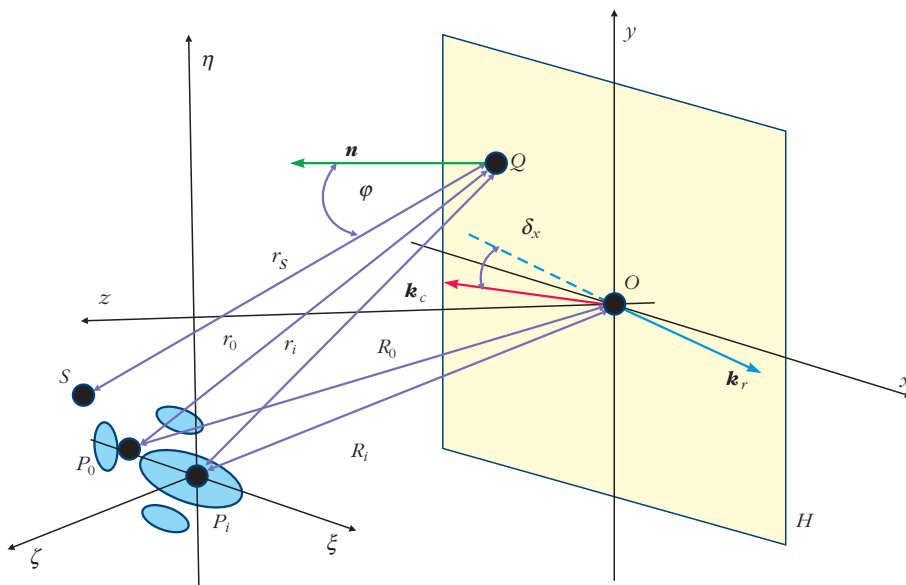
A vizsgált modell a 3. ábrán látható, a $P_0(x_0, y_0, z_0)$ pontforrásból kiinduló gömbhullámot a hologram síkjában ($z = 0$) rögzítjük. A referencianyáláb egy síkhullám $\mathbf{k}_r = k(\cos\kappa_r, \cos\mu_r, \cos\nu_r)$ hullámvektorral. A hologramot egy másik síkhullámmal rekonstruáljuk, $\mathbf{k}_c = k(\cos\kappa_c, \cos\mu_c, \cos\nu_c)$ hullámvektorral. Ha a két segédnyáláb pontosan egymással ellentétes irányú és azonos hullámhosszú, akkor a hologramról diffraktált hullámfront a tárgynyáláb konjugáltja lesz, és pontosan a P_0 tárgypontra fog fókuszálódni. Ha ez nem teljesül, akkor geometriai optikai aberrációk lépnek fel a $P_i(x_i, y_i, z_i)$ képpont körül.

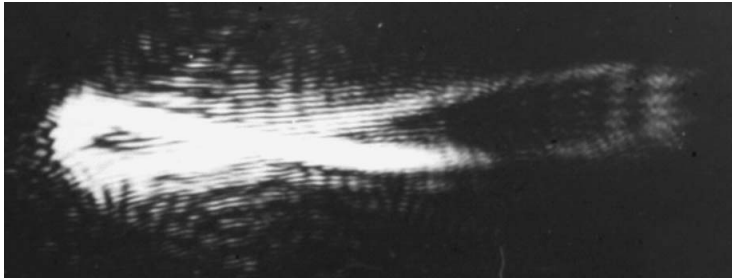
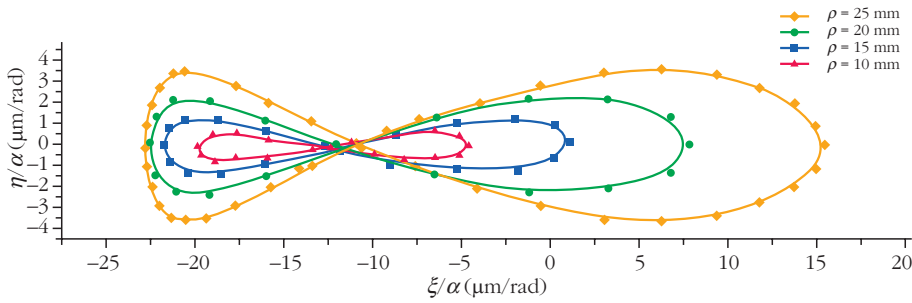
A pontforráshologram geometriai aberrációinak kiszámítását itt nem részletezem, az érdeklődő olvasó megtalálhatja eredeti cikkünkben [16]. Első lépésként a hullámfront-aberrációkat számítottuk ki. Ahogy a 3. ábrán is látható, a rekonstruált kép a hologram központjától a tárggyal azonos távolságra lesz, de a szöghiba miatt eltolódik a tárgyponthoz. A hologramról kiinduló fénysugarak nem egy pontba tartanak, hanem a képsíkot különböző helyeken megszvik. E metszéspontok eloszlását az úgynevezett sugár- vagy transzverzális aberrációk adják meg. Ezeket a hullámfront-aberrációból deriválással lehet kiszámítani.

A harmadrendű aberrációk közül a kóma és az asztigmia fog megjelenni [17]. Asztigmia csak az optikai tengelyen kívül levő pontoknál lép fel, a kóma a tárgyponthoz független. Ha egy kiterjedt tárgy mérete kisebb a hologramnál, akkor a kóma lesz a domináns aberráció. Az eredmények szerint nem lép fel szférikus aberráció.

Ha a hologram numerikus apertúrája $0,5$, átmérője 60 mm és a szöghiba 1 mrad, akkor a rekonstruált képfolt átmérője $30\ \mu\text{m}$ lesz, sokkal nagyobb, mint az aberrációmentes diffrakciós kép.

3. ábra. Pontforrás hologramjának felvétele és rekonstruálása.





4. ábra. A hologram gyűrű alakú részéről rekonstruált fókuszfoltok a meridionális fókusz síkban 6 mrad szöghiba mellett. Fent: számított görbék $\rho = 10, 15, 20$ és 25 mm sugarú körökről. Lent: a 20 mm középsugarú gyűrűről rekonstruált kép mikrofotója.

A hologramok geometriai optikai aberrációinak mérése

A legegyszerűbb módon végeztünk kísérleteket a pontforráshologram aberrációinak mérésére. A tárgyponzt az $y = 0$ síkban volt. A rekonstruáló nyaláb beesési szögének változtatása helyett a hologramot forgattuk az y tengely körül. A pontforrást egy $60\times, 0,85$ numerikus apertúrájú mikroszkópobjektívvel állítottuk elő. A számítások ellenőrzésére és az aberrációs ábrák meghatározására a hologramot gyűrű alakú nyílásokon keresztül rekonstruáltuk. A gyűrűk középvonalának átmérője $10, 15, 20$ és 25 mm volt, szélességük pedig 10 mm. Ez tulajdonképpen egy módosított Hartmann-teszt volt [18, 19], lyukak helyett gyűrűk alkalmazásával. A rekonstruált képről három síkban készítettünk kivetítő mikroszkóp használatával fényképet, a meridionális fókusz síkban, a szagittális fókusz síkban és a legkisebb konfúzió síkjában, a két előbbi közötti távolság felénél.

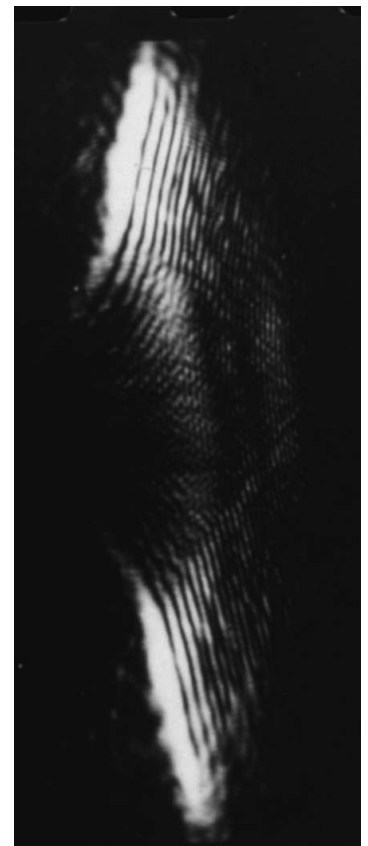
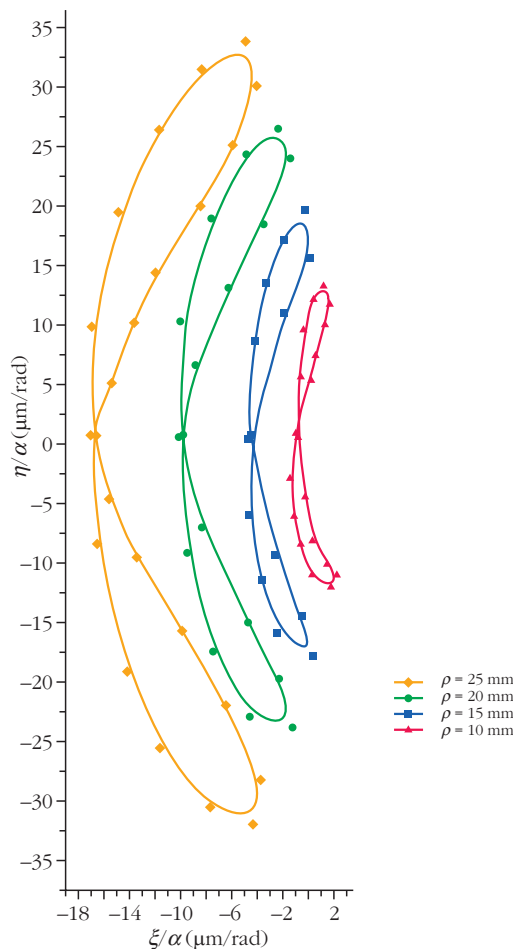
A meridionális sík meg egyezett a tárgysíkkal, ame-

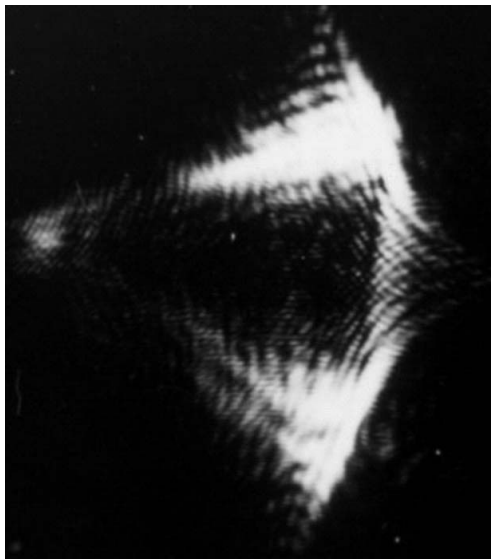
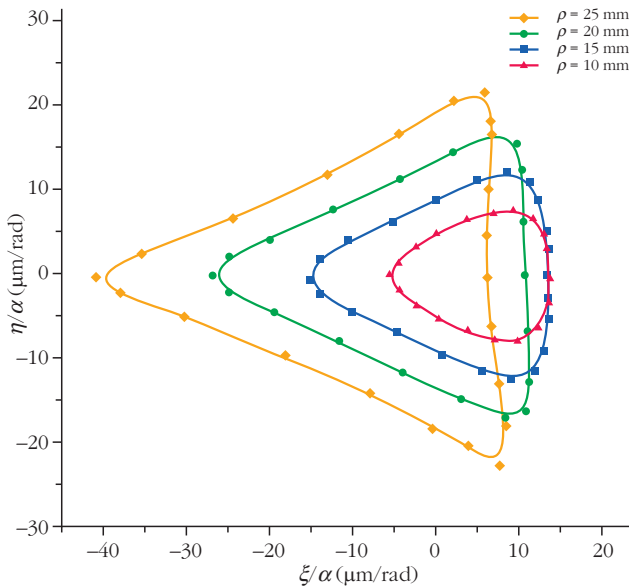
lyet a tárgynyalábot előállító mikroszkópobjektív fókusza rögzített. A másik két fókusz-sík helyzetét a meridionális síkhoz képest mértük.

Különös gondot fordítottunk arra, hogy a kísérleti paraméterek megfeleljenek a számításokban használtaknak. A nagy átmérőjű segédnyalábok egyenletesen világították meg a teljes hologramot. Hullámfrontjuk sík voltát nyíró interferenciával állítottuk be (1 sötét interferenciasík a 80 mm átmérőjű kollimált nyalábbb).

A 4., 5. és 6. ábrán bemutatjuk az aberrációs görbéket a három fókusz síkban. A számítások és a mérések paraméterei a következők voltak: tárgy távolság, $R_0 = 90$ mm, tárgyforrás pozíciója: $x_0 = R_0 \sin 22,5^\circ$, $y_0 = 0$ és a referencialyáb beesési szöge $\kappa_r = 22,5^\circ$.

5. ábra. A hologram gyűrű alakú részéről rekonstruált fókuszfoltok a szagittális fókusz síkban 6 mrad szöghiba mellett. Balra: számított görbék $\rho = 10, 15, 20$ és 25 mm sugarú körökről. Jobbra: a 20 mm középsugarú gyűrűről rekonstruált kép mikrofotója.





6. ábra. A hologram gyűrű alakú részeiről rekonstruált fókuszfoltok a legkisebb konfúzió síkjában 6 mrad szöghiba mellett. Fent: számított görbék $\rho = 10, 15, 20$ és 25 mm sugarú körökről. Lent: a 20 mm középsugarú gyűrűről rekonstruált kép mikrofotója.

Mindhárom ábrán jól megegyeznek a mikrofotókon látható aberrációs ábrák a számítottakkal. Ami az intenzitáseloszlásokat illeti, a mikrofotók fényesebb részei megfelelnek a számított aberrációs kép azon részeinek, ahol kis területen több görbe halad át. Ez nagyon jól megfigyelhető a 4. ábrán látható „vitézkötés” (Varga Péter elnevezése). A bal oldali hurok jóval fényesebb mint a jobb oldali.

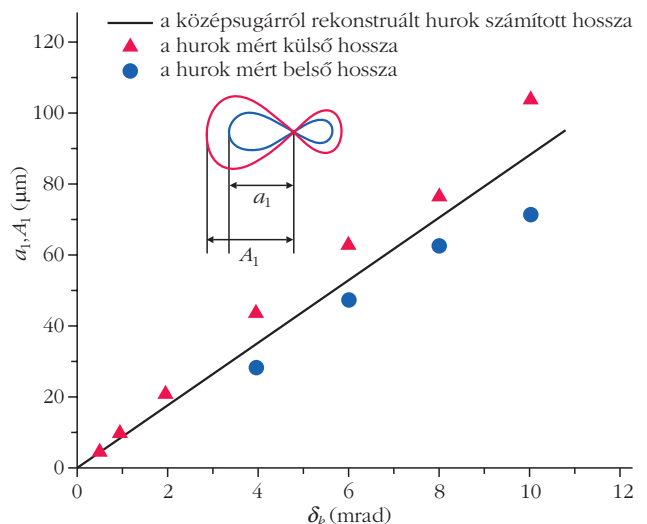
Az eredményeket kvantitatív módon is tanulmányoztuk. A 7. ábrán láthatók a meridionális fókusz síkban kapott vitézkötés (4. ábra) hosszabbik hurkának számított és mért méretei a rekonstruálási szöghiba függvényében. A 20 mm sugarú gyűrű középvonalaról rekonstruált számított vitézkötés hosszabbik hurkának hossza a szöghiba függvényében a fekete vonal. A rekonstruált képen mért külső és belső hosszak piros, illetve kék pontok. A 7. ábrán jó egyez

van a számított és mért eredmények között. Az aberrációs képek kis mérete miatt 4 mrad alatt már nem szerepel a belső hurok hossza. $0,5$ mrad szöghibához már körülbelül $4 \mu\text{m}$ -es hurokhossz tartozik. Ahogy már korábban említettük, az ennél kisebb szöghibák esetében a rekonstruált képet közvetlenül szkenneltük. A rekonstruált kép pontos leírásához pedig a kettős diffrakciós integrál közelítés nélküli alakjának numerikus kiszámítása vált szükségessé.

Összefoglalás

A holografikus fotolitográfia megvalósításának első lépéseként pontforrások nagy numerikus apertúrájú hologramjainak felvételére és rekonstruálására szolgáló precíziós holografikus összeállítást építettünk. A hologramok $632,8$ nm hullámhosszú He-Ne lézerrel lettek felvéve, egy kollimált referencianyalábbal és egy $0,85$ numerikus apertúrájú mikroszkópjobjektívvel előállított kvázi szférikus tárgynyalábbal. A hologramlemez mérete $60 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ volt. A referencianyaláb beesési szöge $22,5^\circ$ volt, és a pontforrást a hologram középpontjával összekötő egyenes $-22,5^\circ$ -ot zárt be a hologram normálisával, a két pont távolsága pedig 90 mm volt. A hologramokat Agfa-Geavert 8E75HD holografikus lemezekre vettük fel, és amplitúdóhologramokként dolgoztuk ki (hívás és fixálás). A hologramok geometriai optikai aberrációit egyszerű analitikus függvényekkel határoztuk meg. A számítások szerint, ha a rekonstruáló nyaláb beesési szöge nagyon kis mértékben (mrad) eltér a referencianyaláb konjugáltjától, akkor már jelentős geometriai optikai aberrációk lesznek a rekonstruált képen. Az elméleti eredményeket módosított Hartmann-tesztekkel ellenőriztük. A módosított Hartmann-tesztek eredményei $0,5$ mrad rekonstruálási szöghiba felett nagyon jól megegyeztek a számítások eredményei-

7. ábra. A 4. ábrán látható aberrációs kép nagyobbik hurkának hossza a rekonstruálási szöghiba függvényében. 20 mm-es gyűrű. Folytonos vonal: a középsugárról rekonstruált hurok számított hossza. Pontok: a hurok mért belső és külső hossza.



vel. Ennél kisebb szöghibák esetében az aberrációkat már a diffrakció figyelembevételével kell kiszámítani. A cikk eredetije 1988-ban jelent meg az *Applied Optics*-ban [16].

Irodalom

1. I. Bányász: Tökéletlen holográfia. A rögzítőanyag nemlinearitásának és véges feloldóképességének hatása a rekonstruált holografikus képre. *Fizikai Szemle* 67 (2017) 255.
 2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Photolithography>
 3. S. Aoki, S. Kikuta: X-Ray Holographic Microscopy. *Japanese Journal of Applied Physics* 13 (1974) 1385.
 4. G. Tricoles: Computer generated holograms: an historical review. *Applied Optics* 26 (1987) 4351.
 5. J. W. Goodman, R. W. Lawrence: Digital image formation from electronically detected holograms. *Appl. Phys. Lett.* 11 (1967) 3
 6. Dawid Kucharski, Monika Bartczak: Application of digital holographic microscopy to evaluate the dynamics of a single red blood cell influenced by low-power laser light. *Optics & Laser Technology* 142 (2021) 107262.
 7. Yiqian Wang et al.: Nondestructive readout of holographic memory in Ag/TiO₂ heterojunction via carbon-dots and hydrogel co-modification. *Appl. Phys. Lett.* 118 (2021) 141601.
 8. Philippe Coni, Natacha Damamme, Jean-Luc Bardon: The Future of Holographic Head-Up Display. *IEEE Consumer Electron-*
- ics Magazine September–October 2019. 69. Doi:10.1109/MCE.2019.2923935
 9. M. D. Levenson, K. M. Johnson, V. C. Hanchett, K. Chiang: Projection photolithography by wave-front conjugation. *J. Opt. Soc. Am.* 71 (1981) 737.
 10. https://en.wikipedia.org/wiki/Phase_conjugation
 11. https://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear_optics#Optical_phase_conjugation
 12. W. H. Carter, A. A. Dougal: Field Range and Resolution in Holography. *J. Opt. Soc. Am.* 56 (1966) 1754.
 13. D. H. R. Vilkomerson, D. Bostwick: Some Effects of Emulsion Shrinkage on a Hologram's Image Space. *Appl. Opt.* 6 (1967) 127.
 14. E. B. Champagne: Nonparaxial Imaging, Magnification and Aberration Properties in Holography. *J. Opt. Soc. Am.* 57 (1967) 51.
 15. J. Nowak, M. Zajac: Numerical Investigation of Holographic Image Quality. *Opt. Appl.* 15 (1985) 23.
 16. I. Banyasz, G. Kiss, P. Varga: Holographic image of a point source in the presence of misalignment *Appl. Opt.* 27 (1988) 1293.
 17. https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_aberration
 18. J. Hartmann: Objektivuntersuchungen. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 24 (1904) 1–25, 33–47, 97–117.
 19. W. A. Calder: The Hartmann Test. In *Amateur Telescope Making Advanced, Book Two*. Edited by Albert G. Ingalls, New York: Scientific American (1970) 109–112.

BEÁGYAZOTT KVANTUMPÖTTYÖK ÉS PLAZMONIKUS NANORÉSZECSEK LÉTREHOZÁSA ÖNSZERVEZŐDÉSSEL

Jáger Gabriella, Tomán János, Erdélyi Zoltán
Debreceni Egyetem, Szilárdtest Fizikai Tanszék

A technológiai fejlődésből következő méretcsökkenés az elektronikai és a vegyi iparban szükségessé tette, hogy előre tudjuk jelezni, vagy meg tudjuk magyarázni a nanométeres skálán lezajló folyamatokat. Ezt teszik lehetővé a különböző atomisztikus modellek. A molekuladinamika mellett két gyakran használt megközelítés a kinetikus Monte-Carlo-módszer (KMC) és a kinetikus átlagtérmodell (KMF). Utóbbi két megkö-

zelítés között helyezkedik el a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszék és a Cherkasy Egyetem munkatársai által kifejlesztett sztochasztikus kinetikus modellezési keretrendszer (Stochastic Kinetic Modeling Framework, SKMF).

Az SKMF egy 2016-ban publikált [1], gyors, alacsony gépigényű¹ módszer, amely egy háromdimenziós kristályban az atomi rácshelyeken értelmezett összetételeket a megfelelő atomok megtalálási valószínűségeként értelmezi.² Legegyszerűbb esetben, sok KMC-módszerhez hasonlóan az SKMF is a legközelebbi szomszédok közötti kölcsönhatásokat veszi figyelembe, valamint sztochasztikus jellegű, viszont ebben az eljárásban a sztochaszticitás mértéke hangolható, és egyetlen SKMF-futtatás eredménye nagyszámú KMC-állapot átlagát adja. Az említett tulajdonságok következménye, hogy az SKMF egy közönséges számítógépen a modellezett rendszermérettől és időtartamtól függően néhány perc, óra vagy nap alatt könnyen értelmezhető

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Innovációs és Technológiai Minisztérium által meghirdetett Tématerületi Kiválósági Program (TKP2020-IKA-04) támogatta, és az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-3-I-DE-122 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával valósult meg (ösztöndíjas: J. G.).



Jáger Gabriella jelenleg PhD hallgató a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékén. 2016 óta végez kutatómunkát Erdélyi Zoltán és Tomán János vezetése mellett. A szilárd testekben zajló diffúziós folyamatok tanulmányozása céljából szimulációs (SKMF) és kísérleti munkában is részt vesz. Jelenleg az Új Nemzeti Kiválóság Program ösztöndíjasa.

¹Nem igényel speciális hardvert, például szuperszámítógépet vagy videokártyát, a szimulációk futtatásához elegendő egy közönséges asztali számítógép vagy laptop.

²Ez egy átlagtérmodell, amely nem összekeverendő azzal, amelyben a rendszer összes részecskéjének hatását egy átlagos potenciáltérként veszik figyelembe, bár a két eljárás azonos eredményre vezet.

eredményt ad, ami nem igényel speciális statisztikai elemzést. Ezzel szemben a hagyományos Monte-Carlo-szimulációk esetén például a fázisok méretének, összetételének meghatározása statisztikai elemzést, sokszor sok különböző szimuláció futtatását igényli. Mivel az SKMF-ben az egyes rácshelyeken közvetlenül a megtalálási valószínűséget számoljuk, itt ez a plusz elemzési lépés szükségtelen. A diffúzió az SKMF jelenlegi verziójában kicserélődéses mechanizmussal valósul meg.³ A módszer további előnye, hogy algoritmusai könnyedén megérthető, így a <http://skmf.eu> honlapon elérhető, nyílt forráskód az adott kutatási területnek megfelelően módosítható.

A kinetikus Monte-Carlóval szemben ebben a módszerben az összetételüggő kölcsönhatási paraméterek használata egyszerűen implementálható. Ennek jelentősége abban rejlik, hogy a valódi fázisdiagramokhoz használt termodinamikai paraméterek általában a lokális összetételtől függenek. Amennyiben az anyagok kölcsönös oldékonysága nagy, akkor fázis-szeparált esetben – mint jelen cikkben a nanorészecskék és a mátrix rendszere –, a hagyományos atomisztikus módszerekkel rendkívül nehéz és számolásigényes a fázishatárok és fázisösszetételek meghatározása. Tehát az SKMF egy sokoldalú módszer, amely – többek között – lehetővé teszi az olyan atomisztikus folyamatok tanulmányozását is, mint a spinodális bomlás, a nukleáció és növekedés, az Ostwald-érés, vagy a vegyületfázisok kialakulása.

Ebben az írásban az SKMF-módszert arra használjuk, hogy jobban megértsük az alacsony energiájú ionokkal implantált minta hőkezelése során kialakuló kvantumpöttyök vagy plazmonikus nanorészecskék keletkezésének folyamatát.

³Bár a modellnek létezik vakanciamechanizmussal működő változata is, az egyrészt lényegesen lassabb, másrészt egyensúlyi vakanciakoncentrációt feltételezve ugyanazt az eredményt adja, mint a kicserélődéses mechanizmussal működő verzió.



Tomán János egyetemi adjunktus, okleveles anyagkutató. 2016 óta a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékének munkatársa. Kutatásának gerincét a szilárd testekben lezajló atommozgási folyamatok különböző módszerekkel történő számítógépes szimulációja képezi. Tagja a háromdimenziós sztochasztikus kinetikus átlag-termodell (SKMF) fejlesztőcsapatának.



Erdélyi Zoltán az MTA doktora, a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára. PhD-fokozatot anyagtudományból Franciaországban, fizikából a Debreceni Egyetemen szerzett. Több európai és egy japán egyetemen volt vendégprofesszor, vendégkutató. Főbb kutatási területe az atommozgási folyamatokkal összefüggő jelenségek kísérleti és elméleti vizsgálata. Munkásságát Selényi Pál-díjjal ismerték el.

Az alacsony energiájú ionokkal történő implantálás során egy hordozóra növesztett, vékony, szigetelő, jellemzően valamilyen oxidréteg felületét keV nagyságrendbe eső energiájú fém- vagy félvezetőionokkal bombázzák, amelyek maximum néhány tíz nanométeres mélységig hatolnak. Az implantációs folyamat sokféle eredménnyel járhat, függően a választott anyagoktól, az ionenergiától, az iondózistól, az ionáramtól és a hordozóhőmérséklettől stb., emiatt ipari alkalmazások szempontjából igen rugalmas technikának számít, amelyek közül sok egy energetikailag hatékonyabb jövőt céloz meg. A leggyakrabban vizsgált rendszerek közül sok olyan mátrix- és implantáltanyag-párokat használ, amelyek fázisszeparálódóak, azaz a keverékben energetikailag kedvezőbb az azonos atomok közötti kötések kialakítása. Ezért az implantált ionok elkülönülő nanorészecskékként válnak ki a szigetelő vékonyrétegben az implantációs folyamat, vagy az azt követő hőkezelés során. Az így létrehozott, szigetelő oxidba ágyazott, félvezető vagy vezető nanorészecskék ígéretes nanokompozitok lehetnek a nemfelejtő memóriák, egyelektron-tranzisztorok, fotonikai eszközök, hatékonyabb fotovoltaiikus eszközök, vagy katalitikus felületek kifejlesztése céljából.

A továbbiakban azt az esetet tárgyaljuk, amikor az implantációs folyamat egy túltelített szilárd oldatot eredményez, amelyben az anyag szeparációjához további hőkezelés szükséges.

Amennyiben az implantált anyag félvezető, akkor a kialakuló, nagyon kicsi, sokszor csak néhány nanométeres nanorészecskéket gyakran illetik a kvantumpötty névvel. Ezt az elnevezést annak az érdekes tulajdonságuknak köszönhetik, hogy diszkrét energianívókkal rendelkeznek, mint holmi mesterséges atomok. Tulajdonságaik ebben a tekintetben a makroszkopikus méretű félvezetők és az önálló atomok között helyezkednek el.

Amennyiben az implantált anyag valamilyen fém, akkor a kiváló nanorészecskék plazmonikus tulajdonságait lehet kiaknázni. Lokalizált felületiplazmonoszillációknak nevezzük a nanoméretű fém objektumok és szigetelők határfelületén elektromágneses gerjesztés hatására kialakuló kollektív elektronoszillációkat [2].

A kétalkotós reguláris szilárd oldatok klasszikus elméleti leírásából tudjuk, hogy a fázisszeparációs tartományt két altartományra szokás osztani (*1. ábra*). Az egyik a nukleáció és növekedés tartományának elkeresztelt metastabil tartomány, ahol akkor tud megindulni az implantált anyag kiválása, ha a rendszerben a termikus fluktuációk hatására kialakul egy kritikus méretnél nagyobb inhomogenitás, azaz elegendő implantált atom keveredik egymás mellé ahhoz, hogy stabil nukleuszt alkotva további növekedése a rendszer számára energetikailag előnyös legyen. A másik tartomány a spinodális bomlás instabil tartománya, ahol sokkal kisebb fluktuáció is az anyagok gyors szétválását okozza, és egy karakterisztikus távolsággal rendelkező mintázat formájában szeparálódik a legsebbségben lévő implantált anyag. Bár mindkét me-

chanizmus az implantált- és mátrixanyagok szeparációját okozza, a kialakult mintázat igen eltérő lehet. A szakirodalomban a spinodális bomlást általában a címlapon⁴ látható folytonos, hosszúkas, labirintusszerű mintázattal azonosítják, nem elkülönülő nanorészecskékkal.

Ebből kifolyólag az ionimplantációról szóló irodalomban a fázisszeparálódó rendszerekben lezajló nanorészecske-keletkezést gyakorlatilag mindig a nukleáció és növekedés folyamatához kötik. A spinodális bomlás lehetősége szinte fel sem merül, még annak ellenére sem, hogy a használt anyagok gyakran rendkívül alacsony oldékonysággal rendelkeznek egymásban, azaz az implantált anyag mennyisége a minta valamely részében könnyen a spinodális bomlás tartományában lehet.

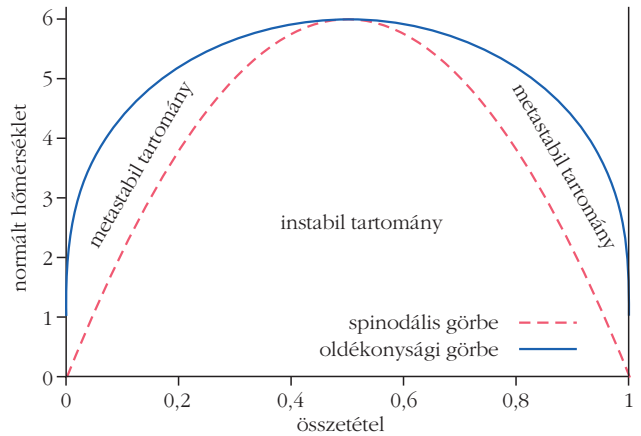
Az SKMF-en alapuló számítógépes szimulációink lehetőséget adnak a spinodális bomlás szerepének tisztázására a hőkezelés során történő nanorészecske-keletkezésben. Ezáltal választ kaphatunk arra a kérdésre, hogy az implantált, kis oldékonysággal rendelkező, fázisszeparálódó rendszerekben képes-e a spinodális bomlás elkülönülő nanorészecskéket létrehozni, annak ellenére, hogy az ionimplantációs szakirodalom lényegében figyelmen kívül hagyja ezt a lehetőséget. Ennek jelentősége abban rejlik, hogy a spinodális bomlással létrejött szerkezetek jól meghatározott modulációs hullámhosszal rendelkeznek, és így a folyamat az önszerveződés egyik legkönnyebben megvalósítható formájának tekinthető. A legtöbb alkalmazásban, ahol beágyazott nanorészecskéket használnak, az egyenletes térbeli eloszlás előnyös lehet a teljesítmény szempontjából.

Az SKMF-modell alapegyenletei, paraméterei

A fenti problémához használt számítógépes modell az eredeti (2016-os) SKMF-modell továbbfejlesztett változata, amely a 2021-ben publikált, már háromdimenziós objektumokban lezajló atomisztikus folyamatok modellezésére is alkalmas 3DO-SKMF [4] modell elődje.⁵

Az eredeti SKMF-modellhez hasonlóan, x és y irányban periodikus határfeltételeket alkalmazunk, de z irányban véges a rendszer: felül a környezetével (E „Environment”) áll kapcsolatban, alul egy hordozóhoz (S „Substrate”) van kötve.⁶

A modellben egy rögzített háromdimenziós rácsot definiálunk, amelyen c_i betöltési valószínűségeket számítunk – ezek annak valószínűségét adják meg, hogy egy adott i -edik rácshelyet egy implantált A



1. ábra. Az oldékonysági és a spinodális görbe.

atom foglal el. Következésképpen, egy kétalkotós rendszerben, annak a valószínűsége, hogy egy i -edik rácshelyet egy B mátrixatom foglal el, $1-c_i$.

A c időbeli változását az i . rácshelyen a megtalálási valószínűségek $J_{i,j}$ ki- és $J_{j,i}$ befolyó áramainak összege határozza meg, amelyeket az i -edik rácshely és annak p_i darab legközelebbi szomszédos j . rácshelye között vesszünk figyelembe. Az anyagmegmaradás értelmében:

$$\frac{dc_i}{dt} = - \sum_{j=1}^{p_i} (J_{i,j} - J_{j,i}). \quad (1)$$

A modellben a sztochaszticitás az áram additív taggal való bővítésével valósult meg, így a megtalálási valószínűségek teljes árama két rácshely között:

$$J_{i,j} = J_{i,j}^{\text{MF}} + \delta J_{i,j}^{\text{Lang}} = c_i(1-c_j)\Gamma_{i,j}^{\text{MF}} + \delta J_{i,j}^{\text{Lang}}, \quad (2)$$

ahol $J_{i,j}^{\text{MF}}$ az átlagtérmodell által jósolt áram, a $\delta J_{i,j}^{\text{Lang}}$ pedig a dinamikus Langevin-zaj, amelynek szerepét több publikáció is részletesen tárgyalja [1, 5, 6]. E zaj feladata, hogy biztosítsa a termikus fluktuációkat a rendszerben, tehát lehetőséget adjon arra, hogy például egy fázisszeparálódó rendszerben elegendő mennyiségű oldott anyag gyűljön egy helyre, hogy kritikus méretű nukleust létrehozva növekedhessen tovább a kiválás.

$J_{i,j}^{\text{MF}}$ az A atomok betöltési valószínűségének árama az i -edik rácshelyről a j -edik rácshelyre, és persze vissza irányba a B atomok betöltési valószínűségének árama (mintha az A komponens az i -edik rácshelyről a j -edik rácshelyre folyna, a B komponens pedig fordítva). Átlagtér-közelítésben a $\Gamma_{i,j}^{\text{MF}}$ a betöltési valószínűségek kicserélődési frekvenciája az i -edik és j -edik rácshely között⁷

$$\Gamma_{i,j}^{\text{MF}} = \nu \exp\left(-\frac{Q_{i,j}}{kT}\right) = \nu \exp\left(-\frac{2E_0 - E_{i,j}}{kT}\right), \quad (3)$$

⁴A cikkben lévő ábrákhoz az SKMF-módszerrel számolt eredmények keresztmetszeti és 3D-s vizualizációját az OVITO szoftverrel készítettük [3].

⁵A modell legtöbb aspektusát itt nem használjuk, de az egyenleteket teljes alakjukban prezentáljuk.

⁶Az ezek által szolgáltatott határfelületek nagyon fontosak lehetnek alkalmazás szempontjából, de tárgyalásuk túlmutat jelen cikk keretein.

⁷Arrhenius-típusú hőmérsékletfüggést mutat, hasonlóan a kicserélődési mechanizmussal működő KMC-ban a i -edik rácshelyen levő A atom és j -edik rácshelyen levő B atom kicserélődési valószínűségéhez.

ahol ν a próbálkozási frekvencia, $Q_{i,j}$ a kicserélődések aktivációs energiája, k a Boltzmann-állandó, T az abszolút hőmérséklet, E_0 a nyeregponti energia és $E_{i,j}$ az i -edik és j -edik rácshelyek kölcsönhatási energiájának összege. A kölcsönhatási energia az egy adott rácshelyen (valamekkora valószínűséggel) levő atom és annak legközelebbi szomszédjai közötti párkölcsönhatási energiák összegeként definiálható. Tehát egy h -adik (i -edik vagy j -edik) rácshelyen lévő X (A vagy B) atom kölcsönhatási energiája:

$$E_b^X = \sum_{l=1}^{p_h} c_l V_{AX} + \sum_{l=1}^{p_h} (1 - c_l) V_{XB} + e_h V_{XE} + s_h V_{XS}, \quad (4)$$

ahol feltesszük, hogy az adott rácshely első koordinációs héja $Z = p_h + e_h + s_h$ rácshelyet tartalmaz, ahol Z a használt rács koordinációs száma (egy rácshely legközelebbi szomszédainak száma), p_h a h -adik rácshely kötéseinek száma a rendszeren belül, e_h a h -adik rácshelyen lévő A atom és a környezet között létesített kötések száma, míg s_h a h -adik rácshelyen lévő A atom és a mátrix alatti hordozó között létesített kötések száma. A mintán belül keletkezett kötésekre annak a valószínűsége, hogy az egy szomszédos l -edik rácshelyen egy A vagy B atom helyezkedik el, c_l illetve $1 - c_l$. A hordozót és a környezetet is tisztának tekintjük, a rendszer A és B anyagával csak kémiai kölcsönhatást létesítenek, bármilyen anyagtranszport nélkül. V_{AA} , V_{BB} és V_{AB} az A - A , B - B és A - B párkölcsönhatási energiák, míg V_{AS} és V_{BS} a hordozó és az A és B anyagok közötti párkölcsönhatási energiákat jelöli. V_{AE} és V_{BE} ugyanezeket jelöli a környezetre vonatkozóan.

Némi algebra után felírható, hogy

$$E_i^A + E_j^B = (M - V) \sum_{in=1}^{p_i} c_{in} + (M + V) \sum_{jn=1}^{p_j} c_{jn} + 2Z\varepsilon_0 + \frac{1}{2}V(p_i - p_j) + \varepsilon_E(e_i + e_j) + \varepsilon_S(s_i + s_j) + \sigma_E(e_i - e_j) + \sigma_S(s_i - s_j), \quad (5)$$

ahol az in és jn indexek az i -edik és j -edik rácshelyek szomszédait jelölik a szimulált térfogaton belül (ebbe nem tartoznak bele a környezet és a hordozó „rácshelyei”).

A kapott kifejezésben a modell kinetikai és termodinamikai tulajdonságait leíró, makroszkopikus mérésekből vagy ab initio szimulációkból megbecsülhető tényleges bemeneti paraméterek szerepelnek, amelyek mind kifejezhetők a párkölcsönhatási energiák segítségével:

- az E_0 -val és ν -vel együtt a minta belsejében az atomugrások alapfrekvenciáját szabályozó ε_0 paraméter

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{AB} + V_{BB}}{2}, \quad (6)$$

- a minta-környezet és minta-hordozó határfelületeken érvényes ugrási frekvenciákat meghatározó ε_E és ε_S paraméterek

$$\varepsilon_E = \frac{V_{AE} + V_{BE}}{2} - \varepsilon_0 \quad (7)$$

és

$$\varepsilon_S = \frac{V_{AS} + V_{BS}}{2} - \varepsilon_0, \quad (8)$$

- a kölcsönös diffúziós együttható összetételfüggetlenségét hordozó M paraméter

$$M = \frac{V_{AA} - V_{BB}}{2}, \quad (9)$$

- a szegregációs tendenciákat meghatározó σ_E és σ_S paraméterek

$$\sigma_E = \frac{V_{AE} - V_{BE}}{2} - M \quad (10)$$

és

$$\sigma_S = \frac{V_{AS} - V_{BS}}{2} - M, \quad (11)$$

- a tömbi rendszer termodinamikai viselkedését leíró V reguláris szilárdoldat-paraméter

$$V = V_{AB} - \frac{V_{AA} + V_{BB}}{2}. \quad (12)$$

V előjelétől függ, hogy a rendszer mely kötések kialakítását preferálja:

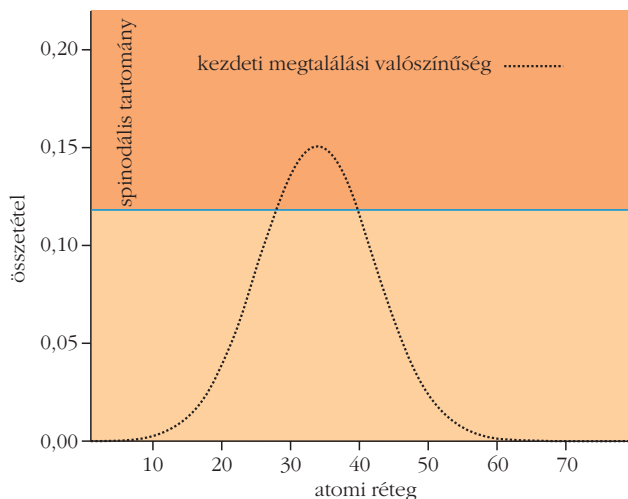
- rendeződő rendszerekben $V < 0$: az A - B kötések kialakítását preferálja a rendszer;
- ideális rendszerekben $V = 0$: nem számít, hogy A - A , B - B vagy A - B kötések vannak jelen;
- fáziszeparálódó rendszerekben $V > 0$: az A - A és B - B kötések kialakítását preferálja a rendszer.

Továbbiakban minden paraméter értékét 0-ra állítjuk, csak a V paraméter kap pozitív értéket, hogy fáziszeparálódó rendszert modellezhessünk.

Implantáció utáni hőkezelés számítógépes szimulációi

Számításainkban a rendszer termodinamikai viselkedésének jellemzésére a $V/(kT) = 0,4$ értéket választottuk, amely azt jelenti, hogy az oldékonysági határok $c_{eq} \approx 0,0089$ és $c_{eq} \approx 0,9911$. Tehát a vizsgált hőmérsékleten az anyagok termodinamikai egyensúlyban kevesebb mint 1%-ig oldódnak egymásban. A spinodális tartomány határai $c_{sp} \approx 0,118$ és $0,882$.

Mivel az ionimplantáció jelenleg is széles körben használt és jövőbeli alkalmazások szempontjából még mindig ígéretes technológia, sokféle módszer is létezik az implantált anyag eloszlásának kiszámolására.



2. ábra. Implantált A atomok Gauss-eloszlást követő összetételprofilja.

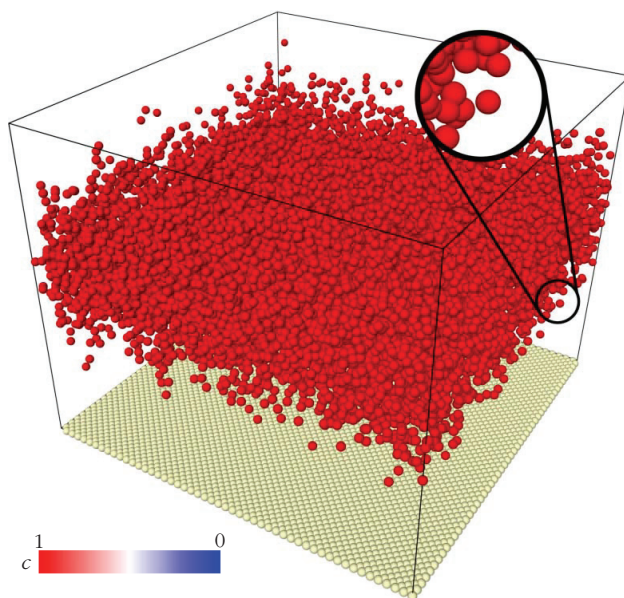
Az implantált anyag valódi eloszlásának kiszámításához figyelembe kell venni az ionnyaláb minta felületén okozott porlasztó hatását, az implantált ionok kölcsönhatását, a minta megvastagodását a többletanyag besugárzása által, valamint az ionnyaláb keverő hatását minta-hordozó határfelületnél. Az egyszerűség kedvéért itt egy egydimenziós Gauss-eloszlást veszünk a szimulációk bemeneteként, amely igen jó első közelítés. A görbe paramétereit úgy választottuk, hogy az implantált A atomok maximális összetétele a spinodális bomlás tartományába essen (2. ábra). Ezt a bemeneti összetételprofilát értelmezzük az A atom megtalálási valószínűségeként az adott síkokon.

Mint említettük, a V paraméteren kívül minden paraméter értéke 0. Ez azt jelenti, hogy szimulációinkban a zajt, amely alapfeltétele lenne a nukleációs folyamat megvalósulásának, szintén teljesen kikapcsoltuk. Így lehetőségünk nyílik szeparáltan vizsgálni a spinodális bomlás hatását.⁸

A hőkezelési szimulációt kétféle kezdőállapottal is megvalósítottuk, amelyeket 3. és 4. ábrákon jelenítünk meg. A képeken a kinagyított részek az összetételek vizualizációjának módját hivatottak szemléltetni. A rácshelyeken megjelenő kis gömbök sugara az implantált A atomok megtalálási valószínűségével skálázódik, és ezzel együtt a színe is változik az ábra melletti színskála szerint.

a) Az egyik kezdőállapot az úgynevezett „atomisztikus kiindulás” (3. ábra), amelyben a rácshelyeken csak 1 vagy 0 szerepelhet, mint ahogy a valós rendszerekben is csak A és B atomok vannak. Minden rácshelyen a bemeneti összetételprofilnak megfelelő valószínűséggel generálunk A atomokat. Ezen véletlenszerűség miatt viszont elméletileg fennáll annak lehetősége, hogy annyi A atomot generálunk egymás mellé, amely már a hőkezelési szimuláció legelején a kritikus érték feletti mérettel rendelkezik, teret engedve ezzel a nukleáció és növekedés folyamatának.

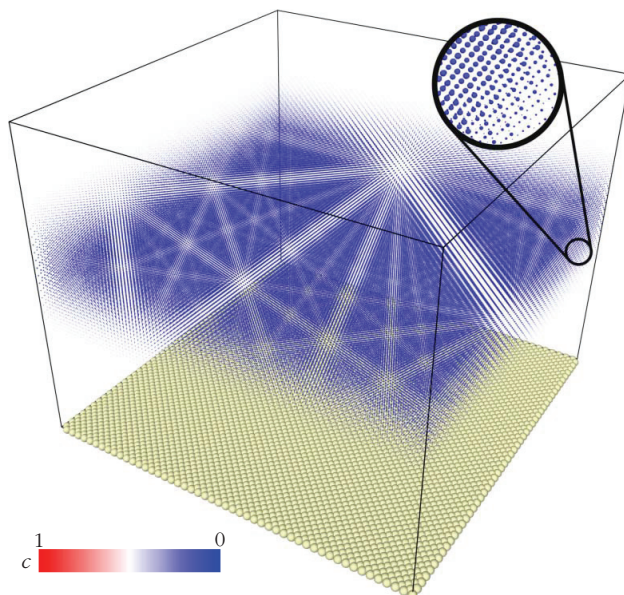
⁸Természetesen egy valós rendszerben van termális fluktuációk okozta zaj is.

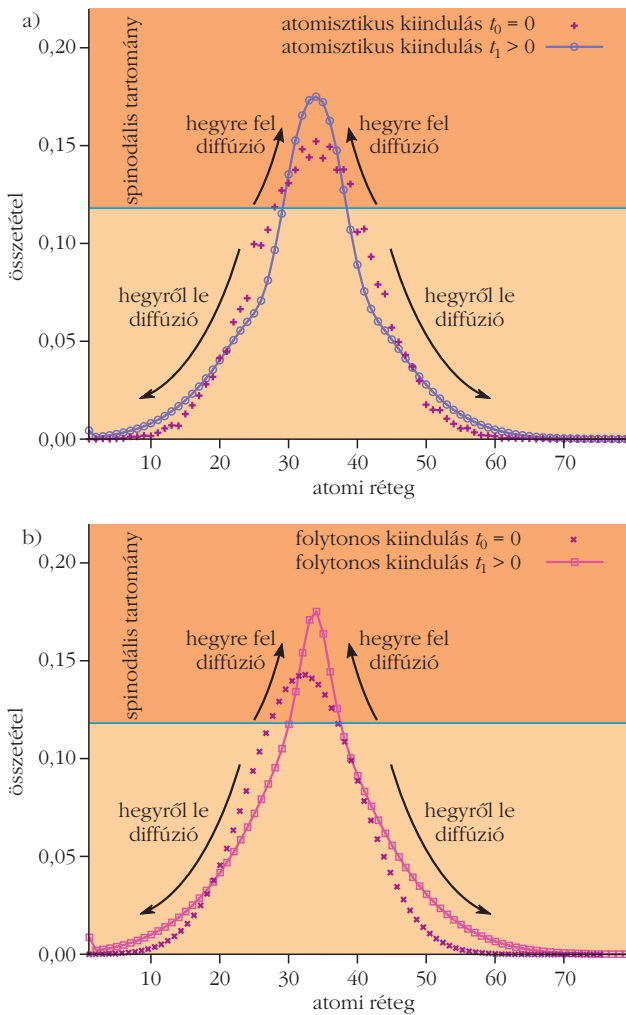


3. ábra. A szimuláció kezdeti állapota „atomisztikus kiindulás” esetén. A rácshelyeken érvényes megtalálási valószínűségek az implantált A atomok esetén $c = 1$, B mátrixatomok esetén $c = 0$. A felnagyított részlet az egyéni implantált atomok láthatóságát segíti. A világos színű réteg a hordozót képviseli.

b) Ebből kifolyólag futtattunk szimulációt az úgynevezett „folytonos kiindulással” is (4. ábra), amelyben kihasználtuk a modell még egy praktikus tulajdonságát, és a szimulációt közvetlenül a kezdeti megtalálási valószínűségekkkel kezdtük, ahelyett, hogy az implantált atomokat véletlenszerűen elosztottuk volna. E kezdőállapotban az egyes rácshelyeken lévő rácshelyek 5%-os bizonytalansággal a bemeneti profil által kijelölt 0 és 1 közötti értékeket vehetik fel, amely

4. ábra. A szimuláció kezdeti állapota „folytonos kiindulás” esetén. Az egyes rácshelyeken a c megtalálási valószínűség az implantált A atomok kezdeti összetételprofiljának megfelelően változik 5% relatív egyenletes bizonytalansággal. Itt, illetve a további ábrákon a megtalálási valószínűségeket a c -vel lineárisan változó sugarú gömbök reprezentálják. Lásd a felnagyított részletet.





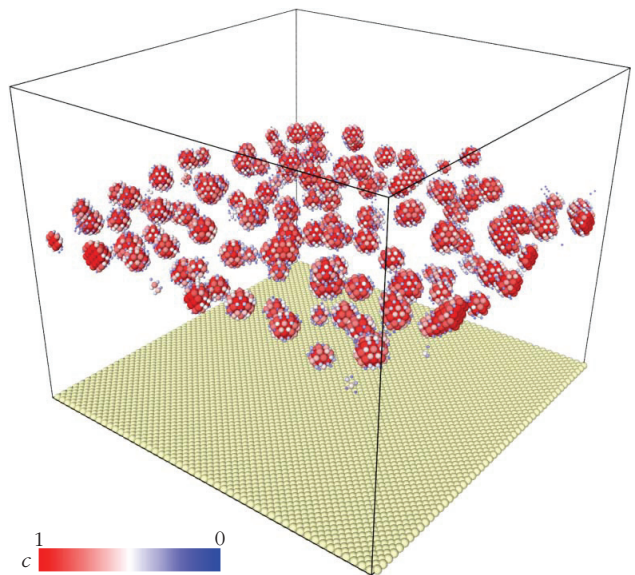
5. ábra. Az összetételprofilok időbeli változása a hőkezelések szimulációja során, a fő diffúziós irányokkal, a) „atomisztikus kiindulás” és b) „folytonos kiindulás”.

ekvivalens az atomisztikus eset nagyszámú legenerálásának átlagával. Itt azonban teljesen biztosak lehetünk benne, hogy a rendszer nem tartalmaz kritikus méretű nukleuszt, így itt – zaj hiányában – a fáziszeperáció csak és kizárólag a spinodális bomlás eredménye lehet.

Ha az a) szimuláció hasonló változásokon megy keresztül, mint a b) szimuláció, akkor kellő biztossággal megállapíthatjuk, hogy abban is spinodális bomlás következett be. Ez pedig természetesen azt jelenti, hogy ez a folyamat biztosan fontos szerepet játszik akkor is, amikor termikus fluktuációk vannak a rendszerben.

Szimulációs eredmények tárgyalása

A megtalálási valószínűség eloszlásokat (5. ábra) megtekintve látható, hogy mindkét esetben hasonló a kezdeti eloszlás (+ és × pontsorok), illetve egy későbbi (t_1) időpillanatbeli állapotot tekintve szintén nagyon hasonló profilokat ○ és □ pontsorok) kaptunk. Ez azt jelenti, hogy mindkét rendszer ugyanazon a változáson ment keresztül, nevezetesen:



6. ábra. Szimulációs eredmények három dimenzióban: az ionimplantált mintában spinodális bomlás útján nanorészecskék képződnek.

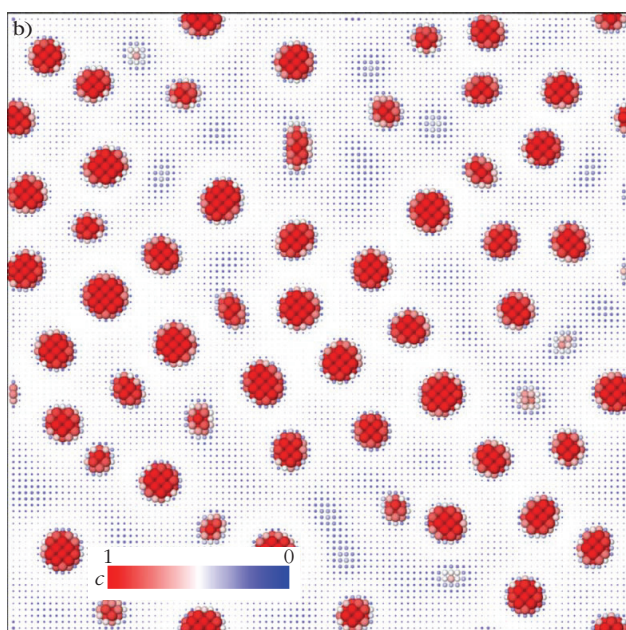
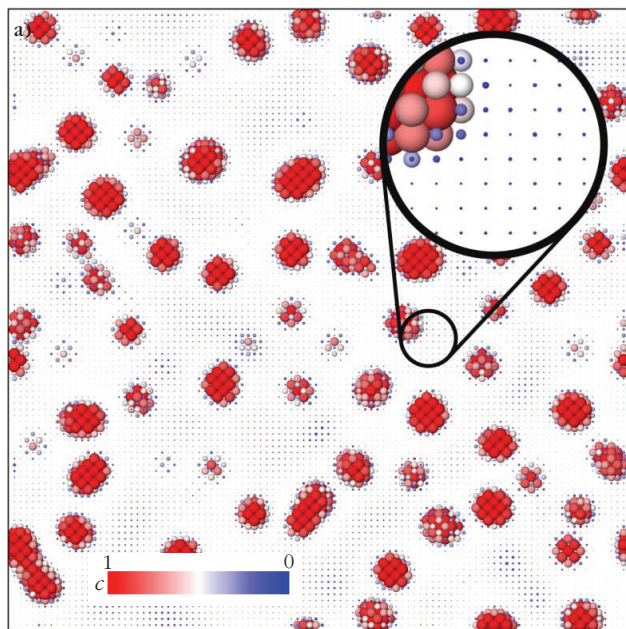
- a spinodális határon kívül „hegyről le” diffúzió történik, tehát a szokásos, összetételgradienssel ellentétes irányú anyagáram jön létre, a Gauss-eloszlás „szétfolyik”,
 - a spinodális határon belül (a kezdeti eloszlás csúcsa körül) viszont úgynevezett „hegyre fel” diffúzió történik, azaz az anyag az összetételgradienssel megegyező irányba folyik, összegyűlik az implantált anyag, a Gauss-eloszlás csúcsa egyre magasabb lesz.
- A rendszert három dimenzióban tekintve (6. ábra) látható, hogy elkülönülő nanorészecskék jöttek létre, és a folytonos kiindulással végzett számolás is bizonyítja, hogy ezért a spinodális bomlás felelős.

A kezdeti eloszlás maximumánál készült metszeti képeket felülnézetben megtekintve (7. ábra) látható, hogy a kialakuló részecskék közötti távolság viszonylag homogén, amelynek értékét a spinodális bomlás leggyorsabban növekvő hullámhossza határozza meg. A látszólag kisebb részecskesűrűség az atomisztikus kiindulás esetében annak köszönhető, hogy mivel kezdetben az implantált atomok nem egyenletesen helyezkedtek el, függőleges irányban a kiválások szórása nagyobb, így az ábrán mutatott atomsíkok alatt vagy fölött helyezkednek el. Ez a hatás az összetételprofilokon is megfigyelhető, az atomisztikus kezdeti állapot esetében a csúcs kevésbé élesedik ki.

Összefoglalás és kitekintés

Az SKMF egy viszonylag új, költséghatékony atomi skálájú technika, amely a rácshelyeken értelmezett atomtörteket a megfelelő atomok megtalálási valószínűségüket értelmezi.

Az SKMF-módszer továbbfejlesztett változata segítségével lehetőségünk nyílt az ionimplantált minták hőkezelése során lejátszódó atommozgási folyamatok



7. ábra. A hőkezelési szimulációk során kialakult részecskék sűrűségét demonstráló síkmetszeti képek. Ezek a besugárzási maximum körüli pár atomi sík vastagságú szeletek. A nanorészecskék a spinodális bomlás során előálló lokális maximumok helyén alakulnak ki. A részecskék között megfigyelhető karakterisztikus távolság a spinodális bomlás leggyorsabban növekvő hullámhosszának felel meg, a) „atomisztikus kiindulás” és b) „folytonos kiindulás”.

tanulmányozására. Rugalmas tulajdonságainak köszönhetően a modell nagyon hasznos eszköznél bizonyult arra, hogy megértsük az ionimplantáció utáni nanorészecske-keletkezést.

Annak ellenére, hogy a spinodális bomlás nagyon elhanyagolt téma az ionimplantációval történő beágyazott részecskék előállítására vonatkozó szakirodalomban, a modell segítségével lehetőségünk nyílt megmutatni, hogy a nanorészecskék keletkezését irányító folyamat gyakran lehet a spinodális bomlás az általában feltételezett nukleáció és növekedés helyett.

Szimulációinkat zaj (sztochaszticitás) nélkül futtatuk, hogy külön tudjuk vizsgálni a spinodális bomlás szerepét a nanorészecske-keletkezésben. Azonban egy reális rendszerben természetesen jelen vannak termális fluktuációk, amelyek beindíthatják a nukleációs folyamat általi nanorészecske-képződést is. Mivel sok kísérleti anyagrendszerben az oldékonyságok nagyon alacsonyak, és emiatt az implantációs összetételmaximumok nagyon gyakran a spinodális tartományba eshetnek, elképzelhető, hogy a nukleáció és növekedés, valamint a spinodális bomlás folyamata egyaránt részt vesz a nanorészecskék keletkezésében.

Meg kell jegyeznünk, hogy bár ebben a munkában csak legközelebbi szomszédok közötti kölcsönhatásokat és fázisszeparálódó tendenciát veszünk figyelembe, a modell nem korlátozódik csak ezekre. Figyelembe vehetünk további kölcsönhatási héjakat és kémiai rendeződést [7], vagy akár n -test potenciálokat. Továbbá, a rácshelyeken értelmezett megtalálási valószínűségek folytonos természetének köszönhetően összetételfüggő kölcsönhatási energiák is könnyedén implementálhatók [8] és a módszer kényelmesen használható a többskálájú szimulációk atomi skálájú tagjaként [9]. Ezen kívül, sztochaszticitás (zaj) nélkül a modell egyensúlyi állapotok, például Janus-nanorészecskék háromdimenziós fázisdiagramjainak kiszámítására is hasznos [10].

Irodalom

1. Zoltán Erdélyi, Mykola Pasichnyy, Volodymyr Bezpalcuk, János J. Tomán, Bence Gajdics, Andriy M. Gusak: Stochastic Kinetic Mean-Field model. *Computer Physics Communications* 204 (2016) 31–37.
2. Kroó Norbert: Fényes új világ: egy új típusú fény és alkalmazásai. *Fizikai Szemle* 57 (2007) 37, <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0702/kroo0702.html>
3. Alexander Stukowski: Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the Open Visualization Tool. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 18 (2010) 015012.
4. Bence Gajdics, János J. Tomán, Zoltán Erdélyi: An effective method to calculate atomic movements in 3D objects with tuneable stochasticity (3DO-SKMF). *Computer Physics Communications* 258 (2021) 107609.
5. Tetyana V. Zaporozhets, Andriy Taranovsky, Gabriella Jáger, Andriy M. Gusak, Zoltán Erdélyi, János J. Tomán: The effect of introducing stochasticity to kinetic mean-field calculations: Comparison with lattice kinetic Monte Carlo in case of regular solid solutions. *Computational Materials Science* 171 (2020) 109251.
6. Andriy M. Gusak and Tetiana Zaporozhets: Martin’s Kinetic Mean-Field Model Revisited – Frequency Noise Approach versus Monte Carlo. *Metallfizika I Noveisbie Tekhnologii* 40 (2018) 1415–1435.
7. Andriy Gusak, Tetiana Zaporozhets, Nadiia Storozhuk: Phase competition in solid-state reactive diffusion revisited – Stochastic Kinetic Mean-Field approach. *The Journal of Chemical Physics* 150/17 (2019) 174109.
8. Bence Gajdics, János J. Tomán, Zoltán Erdélyi: Composition dependent gradient energy coefficient: How the asymmetric miscibility gap affects spinodal decomposition in Ag-Cu? *CALPHAD* 67 (2019) 101665.
9. Bence Gajdics, János J. Tomán, Helena Zapolsky, Zoltán Erdélyi, Gilles Demange: A multiscale procedure based on the stochastic kinetic mean field and the phase-field models for coarsening. *Journal of Applied Physics* 126/6 (2019) 065106.
10. Andriy Taranovsky, János J. Tomán, Bence D. Gajdics, Zoltán Erdélyi: 3D phase diagrams and the thermal stability of two-component Janus nanoparticles: effects of size, average composition and temperature. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 23 (2021) 6116–6127.

KOMPETENCIAFEJLESZTŐ FIZIKATANÍTÁS

Schnider Dorottya – Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium
Hömöstre Mihály – ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék, Budapesti Német Iskola

A fizikaoktatás terén szükséges a módszertani paletta szélesítése annak érdekében, hogy a megváltozott feltételek mellett is eredményesek lehessünk, és megfelelő módszerek alkalmazásával biztosítsuk diákjaink számára az eddigiekhez hasonlóan színvonalas munkavégzést, a megfelelő mélységű tudás megszerzését, a fejlődés lehetőségét és a sikerélményt. Mindehhez a korábban alkalmazott módszerek fejlesztése, új módszerek kidolgozása és tesztelése szükséges. A kompetenciafejlesztő fizikaoktatás lehetőséget ad arra, hogy a tanulóktól elvárt tudást meghatározott követelmények mentén fogalmazzuk meg, teljesítményüket adott fizikai kompetenciaelemek – például: jelenségek önálló leírása, értelmezése, illetve magyarázata, becslés, tervezés, számítások elvégzése, hipotézisállítást, grafikonok készítése és értelmezése – alapján értékeljük, és ezen fejlesztendő készségek figyelembevételével tervezzük pedagógiai folyamatunkat [1–2]. Tanulmányunkban a tanulói kísérletezés módjának egy interdiszciplináris fejlesztési lehetőségét mutatjuk be, és vizsgáljuk annak kompetenciafejlesztésben, illetve a szükséges ismeretanyag elmélyítésében betöltött szerepét. Az általunk fejlesztett feladatok módszertani ismertetésével a gyakorló fizikatanár-kollégák munkáját kívánjuk támogatni.

Kompetenciafejlesztő fizikaoktatás

A változó igényeknek megfelelően változik a tudás fogalma, a tudás átadásának folyamata, valamint a tanulói teljesítmény értékelése is. A nemzetközi vizsgálatok, PISA-mérések elsősorban a megszerzett tudás minőségét mérik fel, azt elemzik. Cél a hasznosítható

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



Schnider Dorottya 2020-ban végzett az ELTE-n angol nyelv és kultúra – fizika szakos tanárként. 2019 szeptembere óta a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium fizikatanára. A diploma megszerzését követően felvételt nyert az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Programba, ahol a mechanika interdiszciplináris tanításának és a tanulói kísérletek fejlesztési lehetőségeit vizsgálja.

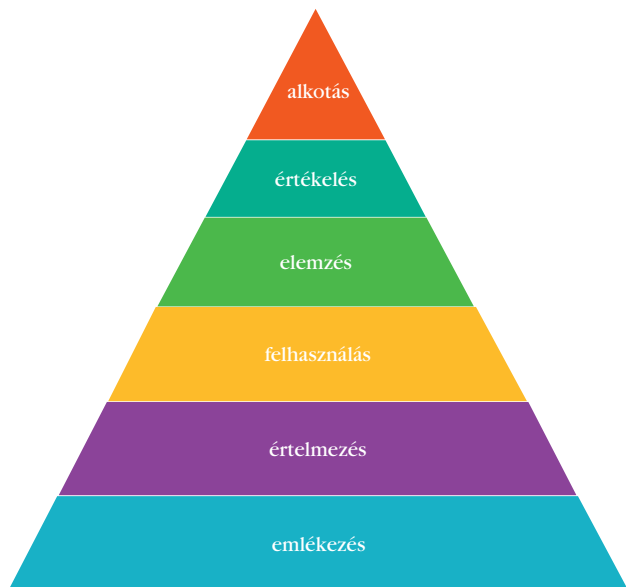
tudás megszerzésének biztosítása. Az oktatásban tehát az életszerű, gyakorlatorientált lehetőségek alkalmazása a hangsúlyos. A tudás tapasztalatok által való kiépülése kellő hatékonysággal történik [3].

Célunk a diákok gondolkodásának fejlesztése, az alkalmazható ismeretek átadása. Tanárként olyan elemek mentén érdemes megtervezni óráinkat, amelyek biztosítják az ismeretek elérhetőségét, megértését, a gyakorlást és az alkalmazást [3]. Az elsősorban frontális munkaformában szervezett oktatást egy olyan tanulócentrikus oktatással érdemes *kiegészíteni*, amely kompetenciafejlesztésre épül, és amelyben a diák aktív résztvevő, valamint élmény- és tapasztalatszerzés útján mélyíti el ismereteit [3–5]. Ez a folyamat fizikaórán megfelelően megvalósulhat. A fizika empirikus tantárgy, a tudás tapasztalatok mentén épül fel. Ahogy az alaptanterv [6] is megfogalmazza, a fizikaoktatás célja a természettudományos szemlélet kialakítása, amelynek iskolai alapjául a kísérletezés szolgál. A világban való eligazodáshoz szükséges, hogy a diák képes legyen előre jelezni folyamatokat, emellett a modellalkotás és a reflektivitás készsége is elengedhetetlen. A gyakorlatorientált oktatás nyit az eredményes nemzetközi trendek felé, ezzel biztosítva a sikeresebb tudástranszfer és a kompetenciafejlesztés lehetőségét. A tevékenység alapú tanítás során a diákok aktívan bevonódhatnak saját tudásuk alakításába megfelelő tanári koordinálás mellett, akár informális környezetben is – például otthon [5].

Fontos, hogy az óratervezés során figyelembe vegyük azon fizikai kompetenciaelemeket, amelyek mentén a diákokat fejleszteni kívánjuk. Ennek alapjául szolgálhat Bloom taxonómiája (*1. ábra*), amely egy követelményalapú, célorientált rendszer. Ezen kimeneti követelmények szem előtt tartásával a tanítási és tanulási folyamat hatékonysága fokozható, miközben olyan készségek fejlesztése történik, amelyek a tudás alkalmazását teszik lehetővé [1].



Hömöstre Mihály 2006-ban végzett az ELTE fizikatanári szakán. 2014 óta a magyar IYPT csapat felkészítő csapatának tagja, 2016 óta az ELTE Anyagfizikai Tanszéken tanít szakdidaktikai tantárgyakat, 2018 óta a Budapesti Német Iskola fizikatanára. MOL Mester-M (2010) és Ericsson-díj (2020) birtokosa.

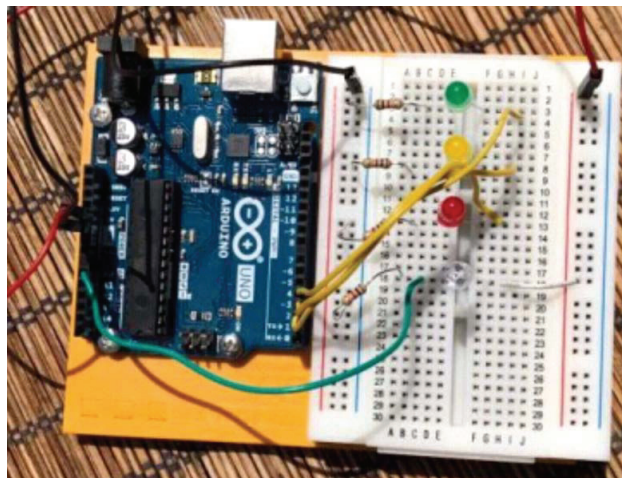


1. ábra. A Bloom-féle taxonómia az 1900-as években pszichológusok által újraforgalmazott rendszere, a tudásszerveződésszintjei [7].

Tanulmányunk célja, hogy egy olyan, általunk fejlesztett és tesztelt módszert mutassunk be és népszerűsítsünk, amely kiemeli a kísérletezés fontosságát, egy természetes és elfogadó tanulási környezetet teremt meg, amelyben a tanár a kimeneti követelmények figyelembevételével irányítottan, a logikai út lépcsőfokain vezeti a diákokat a minőségi tudás megszerzése felé. A módszer lényege, hogy gyakorlatorientált módon, a diákok önálló tevékenységeik – csoportmunkában szervezett tanulói kísérletek és mérések – során mélyítik el a korábban megszerzett ismereteiket. Továbbá a módszer bemutatja, hogy a tanulás közben kompetenciafejlesztés történik, mind ez pedig elengedhetetlen az iskolán kívüli élethez, későbbiekben a munka világához.

A vizsgálat bemutatása

Az alkalmazott oktatási módszer fizikatudás-megszerzésre gyakorolt hatását, valamint a kompetenciafejlesztésben betöltött szerepét első körben a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium 7. osztályos tanulóinak körében végeztük a 2020/2021-es tanévben kontrollcsoport mellett. A tesztcsoportot (27 fő) azok a 2020-ban felvételt nyert tagozatos hetedikes tanulók alkotják, akik a már lecsökkent óraszámok mellett, heti egy órában, az új kerettanterv szerint tanulnak fizikát. A kontrollcsoport (18 fő) a párhuzamos osztály diákjaiból áll. Ők az általános iskolai képzésben vesznek



2. ábra. Arduino UNO és néhány tartozék a készletből.

részt, ezáltal továbbra is heti 2 órában tanulhatnak fizikát. Célunk az volt, hogy megvizsgáljuk, egy éles szemléletváltást követően melyek azok az oktatási módszerek és technikák, amelyek segítségével heti 1 órában is élményalapú, ugyanakkor hatékony fizikaoktatás valósulhat meg. Mindkét osztály fizikatanára *Schnider Dorottya*. A két csoport tanulási folyamatát az 1. táblázatban mutatjuk be.

Vizsgálatunkban a tesztcsoport diákjai csoportmunkában szervezett kísérleteket és méréseket végeztek a korszerű méréstechnika adta lehetőségek – Arduino [8], Arduino-vezérelt szenzorok (2. ábra), digitális mérésiértékelés – fizikaórai felhasználása mellett.

A tesztcsoport munkáját minden órán egy feladatlappal segítettük, amely irányított kérdéseket tartalmazott. Így az alaptól – egyszerűbb kapcsolás összeállítása, alap programkódok megismerése – vezetjük a diákokat a tudásszerzés útján megfelelő logikai úton – az alapok elmélyítése gyakorló, alkalmazási feladatokon keresztül. A kérdéseket és feladatokat a Bloom-taxonómia tudásszerveződésszintjei alapján fogalmaztuk meg, ügyelve a bemutatásra, a megfelelő megalapozásra, gyakoroltatásra, valamint a megszerzett ismeretek alkalmazására, értékelésére, és biztosítottuk az önálló alkotás lehetőségét – adott probléma

1. táblázat

Alkalmazott módszerek és tanulási folyamatok a teszt- és kontrollcsoport esetében a vizsgálat során.		
	tesztcsoport	kontrollcsoport
tanulási fázis	<ul style="list-style-type: none"> • hagyományos • explicit • tanári demonstráció 	<ul style="list-style-type: none"> • hagyományos • explicit • tanulói kísérletek
gyakorló és elmélyítő fázis	<ul style="list-style-type: none"> • hagyományos • papíralapú • frontális feladatmegoldás – számolási feladatok, rögzítést segítő elméleti kérdések 	<ul style="list-style-type: none"> • gyakorlatorientált • tevékenység alapú • feladatmegoldás csoportmunkában – kevesebb számolási feladat, Arduinóval támogatott tanulói mérések

Ismerkedés az Arduinóval

1. Villogó led

Kérdések/feladatok

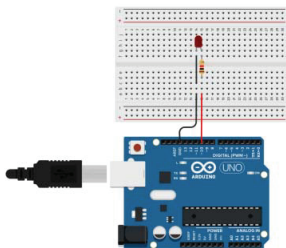
- Becsüld meg, hogy mi az a legkisebb időtartam, amely alatt még különállónak látjuk a led villanását!
- Mi befolyásolja, hogy különállónak látjuk-e a villanásokat?

Ellenőrizd a becslésedet!

A feladat leírása

Programozz be egy ledet úgy, hogy megfelelő periódussal villogjon!

Készítsd el az ábrán látható kapcsolást: fekete kábelt csatlakoztasd az Arduino „Ground/GND” pinjéhez (csatlakozójához), a ledet a 7-es pinhez, a ledet köss sorba egy ellenállással is! A GND feszültsége 0 V, a többi pin max. 5 V feszültséget kaphat.



2. Felváltva villogó ledék

Eszközök

- Arduino + USB kábel + laptop
- 5 darab kábel és „breadboard” (panel)
- 2db led és 2 db 100 ohmos ellenállás

A feladat leírása

Az ábra alapján készítsd el a kapcsolást! A GND pinhez csatlakoztasd egy kábelt, az Arduino egy-egy pinjéhez pedig egy-egy ledet! A ledekkel köss sorba egy-egy ellenállást is!

A feladat nagyon hasonló az előzőhöz, annyi kiegészítéssel, hogy most egy új ledet is bekapcsolunk abban a pillanatban, amikor a másikat kikapcsoljuk, majd fordítva.

Ennek megfelelően, felhasználva és kiegészítve az előző feladat során használt kódot, programozz be két ledet úgy, hogy adott periódusban felváltva villogjanak!

Kérdések/feladatok

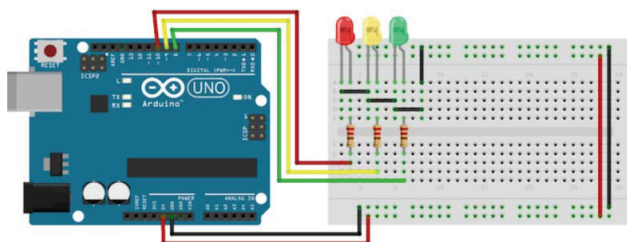
Írd le a saját szavaiddal, hogy hogyan programoztad be a ledeket!

3. ábra. Bevezető feladatok. Ismerkedés az Arduinóval. Forrás: saját szerkesztés.

önálló megvalósítása, például: mérési elrendezés (kapcsolás) megtervezése, programkódok megírása – is. A differenciálás fontosságát szem előtt tartva, a gyorsabb, ügyesebb csoportoknak profiknak szóló szorgalmi feladatokat is megfogalmaztunk. A pedagógiai folyamatok és a kérdéssorok megalkotása során

4. ábra. Tanulói válasz. Jelzőlámpák áramkörének kapcsolási rajza, alatta a helyes összeállítás [9].

a) Tervezd meg a jelzőlámpák áramkörének kapcsolási rajzát!



ügyeltünk arra, hogy az adott feladatok a készség- és kompetenciafejlesztést szolgálják. A csoportokban megvalósuló cselekvésközpontú, tanár által támogatott tanulói kísérletezés egyaránt fejleszti a kommunikációs és szociális készségeket, például együttműködő készség, feladatmegosztás vagy problémamegoldó készség, ugyanakkor olyan kompetenciák fejlődését is lehetővé teszi, mint a tervezés, becslés, értelmezés, elemzés.

A projekt

A digitális kompetencia fejlesztése, illetve a technológiai fejlődés figyelemmel kísérése, és a lehetőségek tanórai alkalmazása a modern fizika-tanítás alapja. A tanórákon Arduinóval megvalósított, csoportmunkában (a 27 fős osztályban 4-5 fős csoportokban dolgoztak a diákok) elvégzendő tanulói kísérleteket választottunk.

Az Arduino használatával a diákok bevezető feladatokon keresztül ismerkedhettek meg.

Az óra az *Ismerkedés az Arduinóval* címet (3. ábra) kapta. Egyszerű, leírás és ábra alapján könnyen megérthető és megalkotható kapcsolásokat készítettek a diákok, valamint megismerkedtek néhány alap programkóddal is. A kódokat előre megadtuk, a diákok értelmezték, illetve felhasználták azokat a megoldáshoz. Feladatuk során ledet programoztak villogásra, majd adott periódusú villogásra. Ezt követően az alapokra (a bevezető feladatok megvalósításával megszerzett tudásra) építve további, összetettebb műveletek végrehajtását vártuk el, például: a feladat leírása alapján önállóan programozzon be 3 ledet úgy, hogy azok egy kereszteződés jelzőlámpáinak megfelelően

2. táblázat

Az öt csoport válasza az 1.b alkérdésre.

Mi befolyásolja, hogy különállónak látjuk-e a villanásokat?

- A villanások között eltelt idő.
- Az, hogy milyen sűrűn villannak fel.
- Hogy milyen gyorsan következnek a villanások egymás után.
- Az, hogy a szemünk hány képet fogad be másodpercenként.
- Az, hogy az agyunk hogyan dolgozza fel a villanást.

működjenek, ehhez egy kapcsolási rajz elkészítését is vártuk (4. ábra). Az igazán profik két, egymásra keresztírányú út forgalmát irányító jelzőlámpát is programozhattak. Az egyes feladatokhoz tartozó alfeladatok – kérdések/feladatok – az értelmezést, leírást, valamint a becslési és tervezési kompetenciák fejlődését kívánták elősegíteni. Az egyes kérdésekre adott tanulói válaszokat a 2. táblázatban mutatjuk be.

A 4. ábra egy önálló tervezést és kreativitást igénylő feladatra adott tanulói választ mutat be.

A projekt folytatásaként fo-
toellenállást programoztak a diákok oly módon, hogy a mért értékeket kiírták az Arduinóval, ezt követően pedig a fényintenzitás távolságfüggését vizsgálták. A fotoellenállást a mobiltelefonjukon található zseblámpával világították meg adott távolságokból. A program által kiírt adatokat grafikonon ábrázolva a diákok megfigyelhették, hogy milyen kapcsolat van a fényintenzitás és a távolság között. Az ügyesebb diákok az adatokat Excelben értékelhették ki. Elvártuk, hogy a diákok tudják értelmezni a grafikon, megfogalmazzák a mennyiségek kapcsolatát, elemezzék a mérést a lehetséges hibák szempontjából, adjanak hibabecslést, valamint indokolják meg, hogy miért nem csökken nullára a mért fényintenzitás.

A ledék és a fotoellenállás együttes alkalmazásával a csoportok a fotoellenállás megvilágíttóságának mértékét jelezték (5. ábra). A feladat az alkalmazás, értelmezés, tervezés készségeket fejleszt.

A kinematika témakörön belül a diákok távolságméréshez használták az Arduinót, ultrahangos távolságmérő szenzort programoztak annak érdekében, hogy meg-

6. Ledes fényerősség kijelző

Eszközök

- Arduino + USB kábel + laptop
- 6 darab kábel és „breadboard” (panel)
- 3db led (lehetőleg zöld, sárga, piros) 1 db fotoellenállás és 3 db 100 ohmos ellenállás.

A feladat leírása

Készítsd el az ábrán látható kapcsolást: a fekete kábelt csatlakoztasd az Arduino „Ground/GND” pinjéhez (csatlakozójához), a zöld ledet a 2-es pinhez, a sárga ledet a 3-as, a piros ledet a 4-es pinhez, a fotoellenállás „piros” felét egy állandó 5 V-os pinhez, a másik, „zöld” felét az „A0” analóg bemenethez/pinhez.

Kérdések/feladatok

- a) Az előző feladatok során használt kódot felhasználva, és azt a feladat leírása szerint kiegészítve, programozd be a ledet úgy, hogy azok a fotoellenállás megvilágíttóságának mértékét jelezzék!

Piros: kevés fény, sárga: közepes fény, zöld: erős fény

- b) Értelmezd a programozáshoz használt kódot 3-5 mondatban!

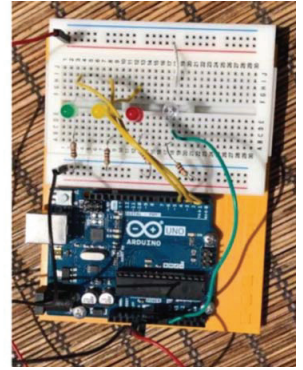
- c) A soros monitor segítségével add meg, hogy mennyi a fényintenzitás mértéke normál körülmények között!

- d) Hogyan tudod változtatni a fényintenzitást?

- e) Ha változtatod a megvilágíttóságot, mekkora a maximális fényintenzitás?

5. ábra. Feladat ledes fényerősség kijelző készítéséhez (részlet). Forrás: saját szerkesztés.

6. ábra. Alapfeladatok az ultrahangos távolságmérő használatára. Forrás: saját szerkesztés.



Távolságmérés

1. Milyen távol van?

Különböző testek távolságának meghatározásához ultrahangos távolságmérő szenzort alkalmazunk.

Eszközök

- Arduino + USB kábel + laptop
- 4 db kábel és „breadboard” (panel)
- Ultrahangos távolságmérő

A feladat leírása

Készítsd el az ábrán látható kapcsolást: a fekete kábelt csatlakoztasd az Arduino „Ground/GND” pinjéhez (csatlakozójához), az echo-t a 2-es, a trigger-t a 3-as pinhez, a szenzor „piros” felét (VCC) egy állandó 5 V-os pinhez.

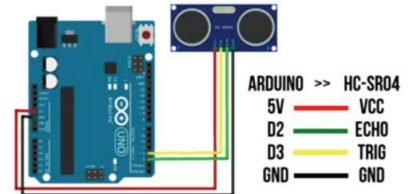
Kérdések/feladatok

- a) Magyarázd az ultrahangos távolságmérő működését? Hogyan adható meg segítségével egy test szenzortól való távolsága? Válaszodat min. 3-5 mondatban fejtsd ki!

- b) Mennyi a hang terjedési sebessége levegőben?

- c) A szenzor mikroszekundumos ($1 \mu s = 10^{-6} s$) időt mér. A távolságot centiméterben szeretnénk megadni. A mértékegységek egyeztetése érdekében add meg a hangsebességet $\frac{cm}{\mu s}$ mértékegységben!

- d) Mérd meg, hogy milyen távolságra van a füzeted, tolltartód, stb. Írnod ki a mért értékeket a soros monitorra, majd onnan olvasd le a távolságadatokat!



tanulják annak működését, mérjenek különböző távolságokat, továbbá felhasználják a gyorsulásmérés során (6. ábra). Az ultrahangos távolságmérést bevezető feladatokkal támogattuk, majd egy következő fejlődési szintre lépve összetettebb probléma (ledek programozása különböző távolságok jelzésére) megvalósítását kértük a csapatoktól. Célunk az volt, hogy a diákok megszerezzék a kellő gyakorlatot ahhoz, hogy a gyorsulásmérés (7. ábra) már gördülékenyen menjen számukra. A gyorsulásmérés manuálisan, hagyományos eszközök segítségével számos hibalehetőséget hordozhat, ugyanakkor Arduinoval segítve a folyamat gyorsabb és pontosabb, továbbá fejlesztő szereppel is bír.

A vizsgálat eredményei

Kutatásunk során előzetes vizsgálatot végeztünk a teszt- és kontrollcsoport tagjai között fellelhető esetleges tudásszintbeli különbségek megfigyelése érdekében. A koronavírus-járvány okozta tanulói hiányzások miatt előtesztként a diákok kutatás előtt szerzett osztályzatait használtuk, amelyek alapján a két osztály előzetes fizikatudására és kompetenciáira statisztikai hipotézisvizsgálatot végeztünk a JASP¹ program használatával. Shapiro–Wilk-teszt² [10–11] alkalmazásával megvizsgáltuk, hogy az adatok normáeloszlást követnek-e. Abban az esetben, ha igen, Student-féle t -próba [12] alkalmazható. Normáeloszlású adatok kiértékelése során f -próbát³ [13] is használunk, amely megmutatja, hogy jelentkezik-e különbség a vizsgált populációk szórásában. Ha a próba p értéke kisebb, mint 0,05, szignifikáns eltérést tapasztalunk, ez esetben a statisztikai elemzést Welch-próbával⁴ [13] folytatjuk; Nem normáeloszlás esetén Mann–Whitney U-tesztet⁵ [12] végzünk. Kijelenthetjük, hogy a különböző tagozatokon tanuló diákok korábbi jegyei, illet-

3. Lejtőn mozgó test gyorsulása

Határozd meg egy lejtőn mozgó test gyorsulását Arduinoval vezérelt ultrahangos távolságmérő szenzor használatával!

Eszközök

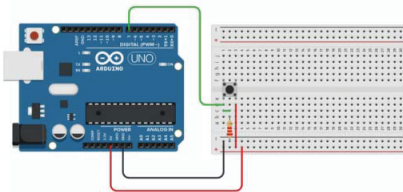
- Lejtő és test
- Arduino + USB kábel + laptop
- Kábelek és „breadboard” (panel), 1 db 100 ohmos ellenállás
- Ultrahangos távolságmérő és gomb

A feladat leírása

Programozzunk be egy távolságmérőt úgy, hogy gombnyomásra mérjen. A mérés addig tart, amíg lenyomva tartod a gombot. Készítsd el a kapcsolást, a gomb egyik kivezetése az 5 V-ba kerül (kösd sorba a távolságmérő VCC kivezetésével), másik pedig egy pinhez csatlakozik. A gombbal köss sorba egy ellenállást is!

Vizsgáld meg a lejtőn mozgó test gyorsulását! Mérd út-idő adatokat, ezeket jelenítsd meg a soros monitoron is! A kapott adatokat ábrázold grafikonon! Add meg a gyorsulás értékét! Változtasd a lejtő hajlásszögét! Milyen összefüggés van a gyorsulás és a hajlásszög között?

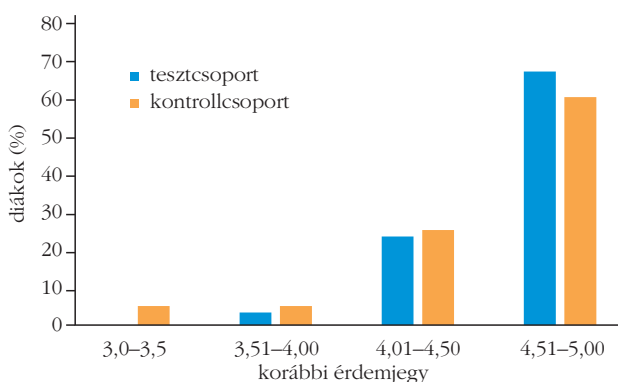
7. ábra. Feladatok a lejtőn mozgó test gyorsulásának vizsgálatára. Forrás: saját szerkesztés.



ve tudása között nem jelentkezik szignifikáns különbség. Shapiro–Wilk-teszt esetén a p értékek: $p_{\text{teszt}} < 0,001$ és $p_{\text{kontroll}} = 0,033$. A két független minta nem követ normális eloszlást (8. ábra). A Mann–Whitney-teszt eredménye: $p = 0,113$. A két minta között – azaz az egyes csoportokat alkotó diákok fizikatudásában – nem jelentkezik szignifikáns különbség.

Annak érdekében, hogy mérhető eredményt kapjunk a hagyományos oktatási módszerek és a fejlesztett kísérletek hatékonyságáról, valamint kompetenciafejlesztésben betöltött szerepéről, a vizsgálatot egy teszttel (dolgozat) zártuk. A tesztre adott válaszok kiértékeléséhez statisztikai elemzést végeztünk a JASP statisztikai kiértékelő program használatával. Megvizsgáltuk, hogy a felmérő kérdéseit a különböző csoportokban tanuló diákok milyen eredményességgel válaszolták meg. A felmérő kinematikafeladatokat tartalmazott. A feladatok között szerepelt grafikonleírás, értelmezés, indoklás, grafikus megjelenítés, becslési és számolási feladat, illetve egy kísérleti összeállítás megtervezése is. Az alkalmazott módszer az egyes kompetenciaelemek fejlődésében betöltött szerepének vizsgálatát, a feladatokon elért pontszámok kiértékelését normalitásvizsgálatot (Shapiro–Wilk-teszt) és f -próbát követően a Mann–Whitney U-teszt vagy Welch-próba segítségével végeztük.

8. ábra. A teszt- és a kontrollcsoportot alkotó diákok osztályzatainak százalékos eloszlása.



¹JASP statisztikai elemző szoftver: <https://jasp-stats.org/>

²A Shapiro–Wilk-teszt célja az eloszlás vizsgálata, $p > 0,05$ mellett az eloszlás normálisnak tekinthető.

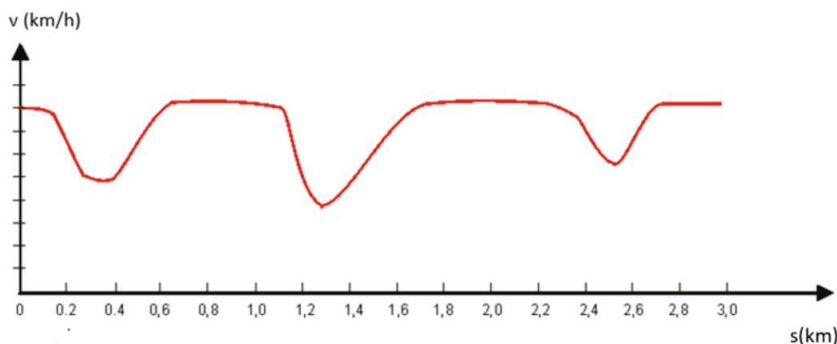
³Az f -próba p értéke alapján döntjük el, hogy van-e különbség a vizsgált populációk szórásában. Amennyiben $p < 0,05$, elvetjük a nullhipotézist, miszerint nincs különbség a populációk között. Ebben az esetben a hipotézisvizsgálatot a Welch-próba segítségével végezzük el.

⁴Ha a Welch-próba p értéke 0,05-nél kisebb, szignifikáns különbséget feltételezünk.

⁵A Mann–Whitney U-teszt egy nemparaméteres próba. Nullhipotézise szerint a két független minta között nincs különbség. Ha $p < 0,05$, a nullhipotézist elvetjük, szignifikáns különbség jelentkezik. $p > 0,05$ esetén a nullhipotézist megtartjuk, a két minta azonos populációból származik.

1. Versenyautó a tesztpályán (9P)

Az alábbi grafikon egy versenyautó sebességét mutatja, miközben az autó a második körét teszi meg egy 3 km hosszú tesztpályán.



startvonal

a) Becsülje meg, hogy nagyjából mekkora út megtétele után ér az autó a startvonaltól a pálya leghosszabb egyenes szakaszához. (1P)

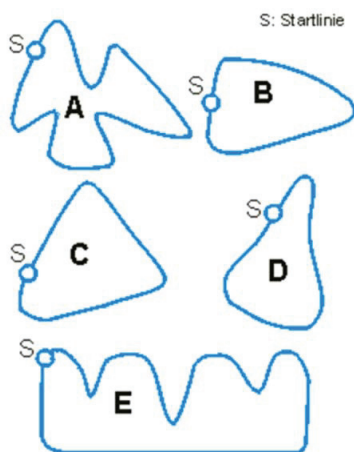
- A) 0,5 km B) 1,4 km C) 2,3 km D) 2,6 km

Válaszát indokolja is max. 2 mondatban! (2P)

b) Határozza meg, hogy a pálya mely részén volt az autó sebessége a legalacsonyabb. (1P)

c) Írja le röviden (max. 2 mondat) az autó mozgását 2,6 és 2,8 km között. (2P)

d) Döntse el, hogy az alábbi ábrák közül melyik mutatja az autó pályáját. Választását indokolja is meg max. 2 mondatban! (3P)



9. ábra. A felmérő 1. feladata [14].

d) kérdésre adott válasz indoklásának megléte/helyessége, valamint minősége között jelentkezett. A tanulónak el kellett dönteniük, hogy a megadott lehetőségek közül melyik ábra mutatja helyesen az autó pályáját. A tanulói válaszokat a 10. ábrán mutatjuk be. A teljeskörű indoklásért/értelmezésért a tanulók maximum 2 pontot szerezhettek, például, ha a diák utalt a kanyarok számára és minőségére (*Milyen éles a kanyar? Milyen ekkor a jármű sebessége?*). A pontszámot bontottuk, így a nem teljeskörű, de jó gondolatot tartalmazó válaszokért 1 pontot adtunk. Ha a diák jól értelmezte a mozgást leíró grafikont, viszont helytelen döntést hozott, az értelmezésért járó pontot megszerezte.

A tesztcsoport tagjai a Mann–Whitney-próba eredményei alapján ($p < 0,01$) szignifikánsan jobbnak bizonyultak indoklás terén. A tesztcsoport tagjai az indoklásra átlagosan 1,52 (szórás: 0,64), míg a kontrollcsoport tagjai 0,56 pontot (szórás: 0,78) kaptak. Érdeemes megjegyezni, hogy a hagyományos számolási feladatok esetén az indoklás alulreprezentált. A tesztcsoport feladataiban azonban a magyarázat és indoklás típusú feladatok nagyobb számban jelentkeztek. A tesztcsoportot alkotó diákok között nem, ugyanakkor a kontrollcsoport tanulói között jellemző volt a tipikusan hibás válasz megjelölése. Közülük 4 diák az a), 1 diák a d), 5 diák pedig az e) jelű pályát jelölte helyesnek, míg 1 tanuló nem oldotta meg a feladatot.

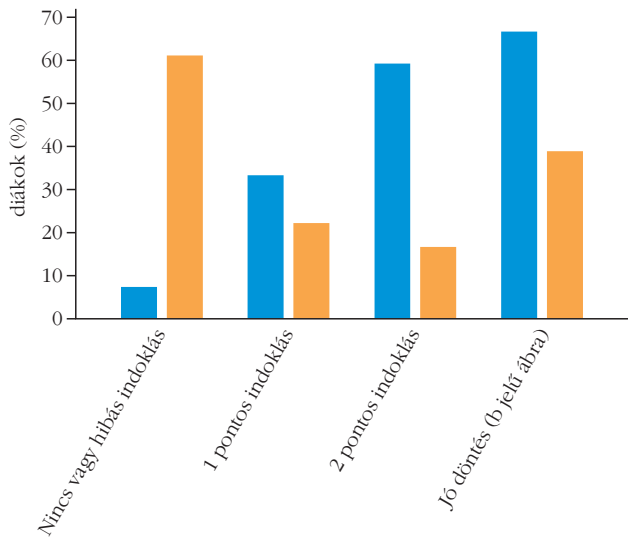
A 2. feladat (11. ábra) egy jármű mozgásának grafikon alapján való leírását várta el a diákoktól. A feladathoz a kvalitatív értelmezés mellett kvantitatív leírás is szükséges volt: a jármű útjának meghatározása adott időintervallumban, valamint a teljes mozgás idejére vonatkoztatva. A feladat c) része grafikus megjelenítést kért a tanulóktól.

A grafikon értelmezése (2.a feladat) kapcsán nem mutatkozott szignifikáns különbség a két mintában (Mann–Whitney: $p = 0,541$), ugyanakkor a b) alkérdés, a számolási feladat megoldása, valamint a c) feladat, azaz a grafikon ábrázolása esetében eltérés jelentke-

Feladatok és kiértékelt tanulói válaszok

A felmérő feladatainak forrásául a leifiphysik.de [14] honlap szolgált. Az első (9. ábra) egy PISA-mérés feladata alapján készült, amely a diákoktól egy versenyautó mozgásának grafikon alapján történő leírását várja, valamint becslést, illetve a grafikon alapján a mozgás pályájának meghatározását. A tanulóktól az egyes rész-kérdések indoklását is elvárják, így vizsgálható, hogy a diákok milyen mélységű és minőségű tudással rendelkeznek. A feladat méri az értelmezés-, becslés- és alkalmazáskompetenciákat, illetve vizsgálja a megértést is.

A feladat a), b), c) rész kérdése nem okozott problémát egyik csapatnak sem, mindkét csoport tagjai hasonlóan jó válaszokat adtak. Szignifikáns különbség a



10. ábra. Tanulói válaszok és eredmények százalékos eloszlása az 1.d feladatra. A diagramok bemutatják, hogy a diákok hány százaléka hozott jó döntést, és érte el az adott pontszámot.

zett. A tesztcsoporthoz tagjai a számolási feladaton átlagosan 2,56 pontot (szórás: 1,97), míg a kontrollcsoporthoz tagjai 1 pontot (szórás: 1,19) szereztek (lásd 12. ábra). A 2.b számolási feladatok esetén a Mann–Whitney-próba alapján szignifikáns különbség mutatkozott ($p = 0,008$), éppúgy mint a grafikus ábrázolás esetében. A tesztcsoporthoz a gyorsulás-idő grafikon felvételére 1,59 (szórás: 1,84) pontot, míg a kontrollcsoporthoz 0,61 pontot (szórás: 1,33) kapott, Mann–Whitney-próba alapján szignifikáns különbség van ($p = 0,049$) (lásd 13. ábra).

A felmérő 3. feladata (14. ábra) összetett, egyaránt kéri az egyszerűbb számolási feladatok megoldását, ugyanakkor felméri a diákok becslési (valós körülményekre adott becslés) és tervezési (kísérlet megtervezése) készségeit is.

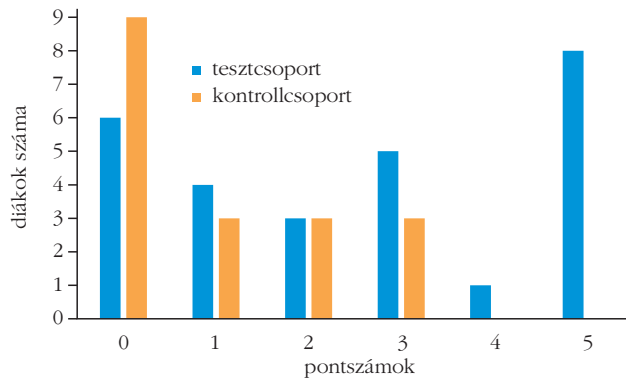
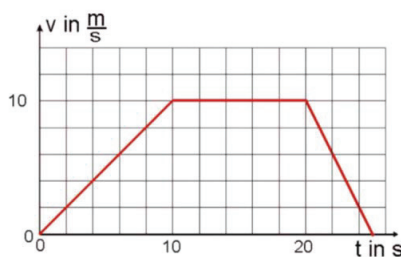
A kiértékelt válaszok alapján a kísérlettervezés készsége mutat szignifikáns különbséget a két csoport között. Pozitív irányú szignifikáns eltérés jelentkezik a tesztcsoporthoz tanulóinak körében Mann–Whitney-próba $p = 0,041$. A kísérlet megtervezésére kapott átlagos pontszám a tesztcsoporthoz 0,85 pont (szórás: 0,95), a kontrollcsoporthoz 0,28 pont (szórás: 0,57). Az eloszlást a 15. ábra szemlélteti. A tesztcsoporthoz 27 diákja közül 18 fő adott választ az e) alfeladatra, közülük 12 diák fogalmazta meg a közegellenállás csökkentésének/kiküszöbölésének igényét, így a válaszok

11. ábra. A felmérő 2. feladata [14].

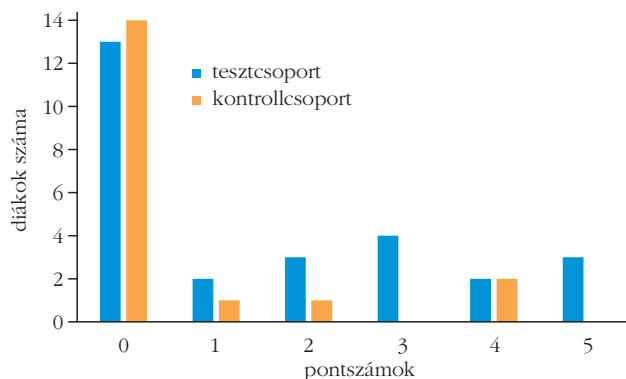
2. Lámpától lámpáig (13P)

A mellékelt grafikon egy autó mozgását mutatja az egyik közlekedési lámpától a másikig.

- A grafikon alapján jellemezd az autó mozgását a két lámpa között.(3P)
- Számold ki az autó által az első 10 másodpercben megtett utat és a két lámpa közötti távolságot is.(5P)
- Készítsd el a mozgás gyorsulás-idő-grafikonját.(5P)



12. ábra. A számolási feladatra (2.b) kapott pontszámok eloszlása a teszt- és a kontrollcsoporthoz tanulóinak körében.



13. ábra. A grafikus megjelenítésért szerzett pontszámok eloszlása a teszt- és a kontrollcsoporthoz tanulóinak körében.

között a légüres térben lezajló jelenségre fókuszáltak. A kontrollcsoporthoz 18 tagja közül csak 8-an oldották meg a tervezési feladatot, közülük csupán 3 diák fogalmazta meg a légüres tér szerepét.

A tudásszerveződési szintek rendszere alapján elmondhatjuk, hogy a módszer a tudás alkalmazását (grafikus ábrázolás, számolási feladatok megoldása), gyakorlati jellegű felhasználását (kísérlet megtervezése) tette lehetővé, emellett támogatta a megértési és az értelmezési (indoklás, magyarázat) feladatok magasabb szintű megoldását.

Kutatásunkat az egyes módszerek hosszútávú tudásszerzésre gyakorolt hatásának vizsgálatával zártuk. A diákokkal a kinematika témakör befejezését követően ismételtlen megírtattuk a témazáró dolgozatot, hogy vizsgáljuk az alkalmazott módszerek információraktározásban, valamint a tudás elmélyítésében betöltött szerepét.

A követő tesztre egy május végi fizikaórán került sor mind a teszt-, mind pedig a kontrollcsoporthoz (a kinematika témakör befejezését követő 4-5 hónap elteltével). Páros t -próbát⁶ [13] végezve megfigyelhe-

⁶A t -próba teszt eredményeinek értékelés: ha $p > 0,05$, megtartjuk a nullhipotézist, amely szerint nincs megfigyelhető hatás, azaz nem jelentkezik különbség.

3. Szabadesés (13P)

Egy erős széllelökés hatására az erkélyről leesik egy virágcserep. A cserép 2 másodpercig zuhan, míg a talajra ért. $g \approx 10 \frac{m}{s^2}$

a) Számold ki a cserép sebességét a becsapódás pillanatában. (3P)

b) Milyen magasról esett le a cserép. (3P)

Az előbb kiszámolt értékek jó eséllyel kicsit eltérnek a valóságos számoktól.

c) Becsüld meg, hogy a valóságban mekkora lehet a tényleges becsapódási sebesség és a kezdeti magasság. (2P)

d) Magyarázd meg az esetleges eltérés okát. (1P)

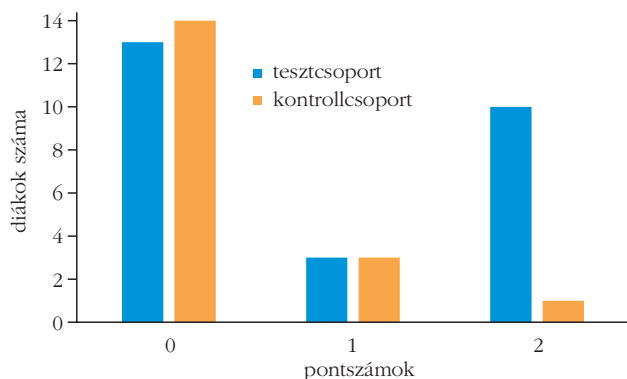
e) Tervezz egy olyan kísérletet, ahol a mért és a számolt adatok közötti különbség szinte teljesen elhanyagolható. (2P)

14. ábra. A felmérő 3. feladata [14].

tő, hogy miként változott a diákok tudása, önmagukhoz képest jelentkezik-e eltérés. A páros t -próba ugyanazon vizsgálati csoport két összetartozó mintáját hasonlítja össze (témazáró és follow-up teszt eredményei). A dolgozat és a követő teszten elért eredményekre Shapiro-Wilk-teszten követően (tesztcsoport esetén: $W = 0,953$, $p = 0,362$; kontrollcsoport esetén: $W = 0,951$, $p = 0,440$) páros t -próba alapján kijelenthető, hogy a kontrollcsoport tudásában nem jelentkezik szignifikáns változás ($p = 0,067$), ugyanakkor a tesztcsoport esetén a hosszútávú tudás raktározásában szignifikáns romlás mutatkozik ($p < 0,001$). Vizsgáltuk továbbá a két független mintát, vagyis a két csoport követő teszten elért pontszámait hasonlítottuk össze. A követő teszten elért eredményekre belátható, hogy azok Shapiro-Wilk-teszt szerint normális eloszlást követnek, a tesztcsoport esetén $W = 0,987$ és $p = 0,990$, a kontrollcsoport esetén $W = 0,919$ és $p = 0,140$, f -próba alapján a szórások nem mutatnak különbséget $p = 0,158$. Független mintás t -próba [12] alkalmazásával vizsgáltuk a csoportok között jelentkező különbségeket. A $p = 0,037$ érték jelzi, hogy a tesztcsoport tanulói szignifikánsan jobbnak bizonyultak a követő teszten, mint a kontrollcsoportot alkotó diákok. A tesztcsoport átlagosan 16,24 pontot (szórás: 7,49), a kontrollcsoport 10,94 pontot (szórás: 4,76) szerzett a follow-up teszten (3. táblázat).

A hosszútávú vizsgálat megfelelően jelzi az egyes kompetenciák elsajátítottságának mértékét. A kontroll-

15. ábra. A kísérlet megtervezéséért szerzett pontszámok eloszlása a teszt- és a kontrollcsoport tanulóinak körében.



csoporthoz képest szignifikánsan pozitív irányú eltérés mutatkozik a tesztcsoportot alkotó diákok következő szakmai kompetenciáiban: mozgás grafikus megjelenítése (Mann-Whitney-próba $p = 0,01$), illetve adott probléma értelmezése (Mann-Whitney-próba $p = 0,003$).

Következtetés, összegzés

A tanulmányban kutatásunk első, kismintás fázisát mutattuk be. Eredményeink megerősítése érdekében további, nagymintás kísérletet tervezünk végezni több középiskolával való együttműködés keretében. Az

eddig elvégzett vizsgálataink eredményei rendkívül biztatók, egyértelműen azt mutatják, hogy a fizikai előéletüket tekintve azonosnak vehető csoportok esetén, a megfelelő kompetenciák terén jól mérhető különbség mutatkozott a tanulói aktivitást használó fizikatanulás esetében a hagyományos tanítási módszerrel dolgozó csoporttal szemben. Kijelenthetjük, hogy a tanórákon megszerzett tudás elmélyítésére pozitív hatással volt a dolgozatban bemutatott, tanulói aktivitáson alapuló Arduinóval segített módszer, amelynek külön előnye, hogy nem csak a fejlesztendő kompetenciaterületek spektrumát szélesíti, hanem az adott tanegység sikeres dolgozattal záró diákok arányát is növeli, valamint pozitív hatással van a tudás elmélyítésére is. Ugyan a módszer hosszútávú tudásra gyakorolt vélhetően pozitív hatása a néhány fizikaórát felölelő projekt során nem mutatkozott meg, a követő teszten a tesztcsoportot alkotó diákok önmagukhoz képest gyengébben teljesítettek, ugyanakkor ennek ellenére is szignifikánsan eredményesebbnek bizonyultak a hagyományos oktatásban részt vevő csoporttal szemben. Biztosabb, elmélyültebb tudásra tehettek szert. Célunk a módszer további fejlesztése oly módon, hogy alkalmazásával elősegítsük a minőségi biztos, hosszútávú tudás megszerzését. Ennek lehetőségét a projekt hosszabb távú, több tanórán át való alkalmazásában látjuk.

Irodalom

- http://okt.ektf.hu/data/forgos/file/tananyag/nadasi/621_a_pedagogiai_taxonmik_bloom_s_kveti.html (utolsó letöltés: 2021. 03. 29.)
- <https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Bildung/Auslandschulwesen/Kerncurriculum/Auslandsschulwesen-Operatoren-Naturwissenschaften-02-2013.pdf> (utolsó letöltés: 2021. 05. 15.)

3. táblázat		
A posztteszt és a követő teszt eredményei a teszt- és kontrollcsoportban.		
	tesztcsoport	kontrollcsoport
posztteszt átlaga (pont)	19,67	11,06
követő teszt átlaga (pont)	16,24	10,94

3. Csapó, B.: *A tudáskonceptió változása: nemzetközi tendenciák és a hazai helyzet.* (2002)
4. Polonyi T., Abari K., Horkai A., Tiszai K.: *Digitális tanulás és tanítás az iskolában.* (2018)
5. Nagy L.-né: A kutatásalapú tanulás/tanítás ('inquiry-based learning/teaching', IBL) és a természettudományok tanítása. *Iskola-kultúra* 12 (2010) 31–51.
6. Magyar Nemzeti Alapintérv, 2020.
7. https://wayne.edu/assessment/files/bloom_s_handout_colored_pyramid.pdf (utolsó letöltés: 2021. 12. 12.)
8. <https://www.arduino.cc/> (utolsó letöltés ideje: 2021. 04. 01.)
9. <https://create.arduino.cc/projecthub/surya2097/arduino-traffic-light-6bbb5a> (utolsó letöltés: 2021. 12. 08.)
10. Pataki A.: *A többváltozós Shapiro–Wilk-tesztek vizsgálata.* Ph.D. doktori értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem Közgazdaságtani Doktori Iskola, Budapest, 2001.
11. D. Graham: *Checking for Normality in JASP.* (2020) <https://www.youtube.com/watch?v=41eOkYHkRSQ> (utolsó letöltés: 2021. 03. 29.)
12. Fidy J., Makara G.: *Biostatisztika. Két összetartozó minta összehasonlítása.* (2005) <https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/biostatisztika-1/ch08s04.html> (utolsó letöltés: 2021. 03. 29.)
13. Nagy L., Balogh, P.: *Ókonometria.* Elméleti jegyzet. (2013) https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0029_de-okonometria_elmelet/ch03s04.html (utolsó letöltés: 2021. 06. 09.)
14. <https://www.leifiphysik.de/> (utolsó letöltés: 2021. 03. 31.)

A VONZÁS HATALMA

Beszámoló a 63. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatóról

Kirsch Éva

Debreceni Egyetem Kossuth Lajos Gyakorló Gimnázium

Az a vonzerő, amit egy fizikatanár az anketon való első részvételekor megérez, tartósan fejt ki hatását. Az egymástól tanulásra és új dolgaik bemutatására kiéheztet pedagógusok a romló járványhelyzet ellenére a megszokott számban vettek részt a 63. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatón (1. kép).

Az erőtér

A váci rendezvény előkészítése már 2019 nyarán elkezdődött, de 2020 tavaszán pár nappal a kezdés előtt, majd 2021 tavaszán is el kellett halasztani. Nagy segítség volt, hogy a helyi szervező, a helyszínt adó iskola és a város mindenkori vezetése töretlen lelkesedéssel és támogatással viszonyult az újra és újra nekilendülő szervezéshez. Ezúttal is köszönetet mondunk Vác Város Önkormányzatának és személy szerint *Matkovich Ilona* polgármester asszonynak a védnökségért, *Kalász Ákos* úrnak a Váci Piarista Gimnázium és Kollégium igazgatójának és a helyi koordinátor *Borbély Venczelnek*.

A végül 2021. október 22–25. között megvalósult anket az általános vélemény szerint igen sikeres volt. Árulkodó lehet az a tény is, hogy a másfél évvel korábbra tervezett program szinte változatlanul átvihető volt. Ez azt jelentette, hogy az előadók újra eleget



1. kép. Tele az előadó.

tettek a felkérésnek és beiktatták feladataik közé az itt tartott előadást. Nem csökkent a műhelyfoglalkozás tartására jelentkezők száma sem, pusztán gazdagodott a bemutatott projektek sora, és értelemszerűen megjelentek az online tanítás időszakában született megoldások is.

A cégek óvatosak voltak a járványhelyzet miatt, ezért a szakmai jellegű látogatásokra most nem kerülhetett sor. Pedig a General Electric gyár és a Püspökszilágy mellett lévő Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló megismerése sok olyan ismeretet adhatott volna a kollégáknak, amelyek alapján hiteles tájékoztatással és motivációval terelhetnék a tanulókat a mérnöki, fizikusi pályák irányába. A szakmai töltekezés helyett a Vácon található kulturális és történelmi értékekkel ismerkedtünk. A Püspöki Palota pompája volt az egyik véglet, a másik a Váci Fegyház Doberdó részlege, amit az 50-es években a politikai foglyok megtörésére alakítottak ki. Október 23-a előestéjén ez különösen megrendítő élmény volt.

A nyitó ünnepségen a köszöntések után a jelenlévők megemlékeztek az utóbbi időszakban elhunyt



Kirsch Éva a Debreceni Egyetem Kossuth Lajos Gyakorló Gimnáziumának kutatótanári fokozatú matematika–fizika szakos tanára. 37 éve pedagógus. 1992-ben az ATOMKI-ban végzett munkájával szerzett doktori címet. Tudománytörténeti színdarabok szerzője és rendezője. Elismerései: Ericsson-díj, MOL a Tehetséggondozásért díj, fizikatanári Vándorplakett. Az ELFT Középiskolai Oktatási Szakcsoportjának elnöke és részt vesz a Science on Stage Hungary szervezői tevékenységében.

kollégákról, majd a szokásoknak megfelelően a díjak átadása következett. A Mikola Sándor-díjat olyan pedagógus kaphatja, aki kísérletező munkájával hozzájárul, hogy a diákság értse és szeresse a fizikát. Ebben az évben a cirkuszvilág fizikájában járatos és azt bemutató *Sinkó Andrea*, valamint az Öveges-verseny szervezői között is tevékenykedő *Tóth Zsuzsanna* érdemelte ki.

A Vándorplakett következő birtokosának kijelölése az előző díjazott személyes döntése, az átadás egy szép hagyomány szerint zajlik. Az idei évben *Pál Zoltánnak* köszönhetően ez visszatekintés is volt, ami a jelenlévő idősebb korosztálynak emlékezetes személyek felidézését jelentette, a fiatalabbak számára pedig fontos üzenetet hordozott: tiszteld a tudást, a tenni akarást, az embert. A plakett büszke tulajdonosa egy évig *Beszeda Imre*.

Majd kezdetét vette a szakmai rész.

Egy rövid statisztika talán érzékelteti azt a gazdag tartalmat, amivel a meghívott előadók, a bemutatást vállaló kollégák megtöltötték a négy napot: kilenc előadás egyetemi tanároktól, akadémikusoktól, kutatóktól; 23 műhelyfoglalkozás; kilenc eszközbemutató; kilenc kísérletbemutató; és egy kísérletes este *Härtlein Károly*val. Mindezek mellett taneszközt gyártó cégek termékeit, csillagászati könyveket és versenykiadványokat lehetett megvásárolni. Az ankét közönsége hallhatott friss kutatási eredményekről és a klímaváltozáshoz kötődő jelenségek vizsgálatáról, elméletéről.

A mágnesek

A plenáris előadások anyaga nagyrészt megtalálható a https://www.kfki.hu/elftkisk/63_Anket/63_Anket.html címen.

Króó Norbert nyitóelőadása azt a kérdést villantotta fel, hogy a felületi plazmonok esélyt kínálhatnak-e szobahőmérsékletű szupravezetés megvalósítására. A felületi plazmon a fém felületén fény hatására kialakuló speciális hullám, melynek vizsgálatában a Cooper-párokhoz hasonlóan elektronpárok megjelenése azonosítható, valamint a mérések a Meissner-effektussal rokon jelenséget is sejtetnek.

Tasnádi Péter online tartotta meg előadását a villámokról. Az új nemzeti alaptantervben ez a téma külön címként jelenik meg, és az ELTE egyik kutatói csoportja tananyagot, mindenki számára elérhető segédanyagot gyűjtött össze. Az előadásban ezekről is hallhattunk, a villámok keletkezésével, fajtáival, elektromágneses terével, a kísérő fényjelenségekkel, tudománytörténeti kapcsolódásával, valamint még megválaszolatlan kérdéseivel ismerkedtünk. A villám nitrogén-dioxidot termel, de ennek klímahatása még nem bizonyított.

Aszódi Attila az energiakérdéssel foglalkozó előadásában arra hívta fel a figyelmet, hogy a fiatalokra nagy terhet rak az a kommunikáció, ami a klímaváltozással kapcsolatban zajlik. Félreértelmezésekből fa-

kadó gondolatok és a megoldás keresésének a felelőssége nyomasztja őket, miközben a világ felnőtt lakossága, a gazdaságpolitika sem tud érvényesíthető és igazán megoldást kínáló stratégiát felállítani.

Szabó Gábor is a klímaproblémára megoldást keresve állapította meg, hogy kell a karbonsemlegesség. Ugyanakkor a világ, az emberek ellentmondásosan reagálnak és cselekednek. Gondoljunk a körülöttünk keringő 900 000 darab 1–10 cm-es úrszemetre, a távvezetékek és az atomerőművek elleni tiltakozásokra. A radioaktív hulladék transzmutációval történő kezelése lehet megoldás, amihez a lézeres neutrongyorsítás kínálhat lehetőséget. Az ELI lézere alkalmas lehet erre.

Krasznahorkay Attila kutatási eredményeiről a beszámolót sokan várták érdeklődéssel. A sötét anyag keresése 30 éve zajlik. Az Atommagkutató Intézetben az atommag párkeltési folyamataiban igyekeznek tetten érni a sötét fotont, a vizsgálati eszköz a tandetron. A különböző energiákon végzett mérések anomáliái magyarázhatók az új részecske feltételezésével, aminek már a standard modellbeli helye is megadható.

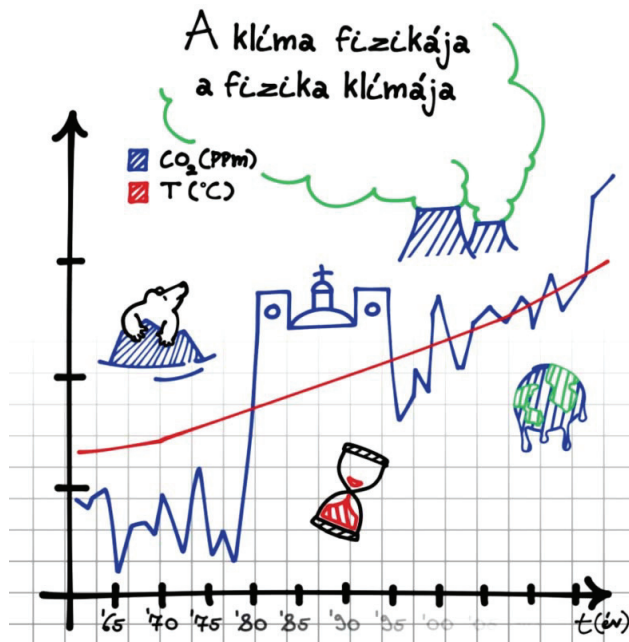
A fizikatanár azt vallja, hogy a természettudományok alapja a fizika – mint fogalomalkotó és alapvető törvények megfogalmazója –, a kémia és a többi tudomány erre épít. Persze mindenki tudja, hogy csak az ember az, aki felparcellázza az ismereteket, hogy jobban eligazodjon benne, de a természet egységes, a nyelve egy. Ennek tanulságos és szórakoztató demonstrációját láthatták a résztvevők *Róka András* ké-

2. kép. Róka András az elektronokat „táncoltatja”.





63.
ORSZÁGOS FIZIKATANÁRI
ANKÉT ÉS ESZKÖZBEMUTATÓ
Vác, 2021. október 22–25.



3. kép. A programfüzet borítója.

mikus elektronokra hangolt előadásában. Nevezhetnénk színházi produkciónak is a zenével, érzelmekre is ható idézetekkel, látványos kísérletekkel tarkított bemutatót, amely ugyanakkor logikai sorra felfűzött, nagy mennyiségű ismeretet közvetített (2. kép).

Sükösd Csaba előadása után joggal érezhette közönség, hogy ezt nem csak fizikatanároknak kellene hallaniuk. Az egyén, illetve társadalmi csoportok által vállalt kockázat fogalmának és számolásának sokrétű megközelítése után a nukleáris ipar hatásaihoz vezetett a gondolat. A atomerőművek biztonságát szavatoló eljárásokat a nadrágtartó és öv alkalmazásával párhuzamba állítva szemléletesen vezette le, hogy a nukleáris energiatermelésből fakadó kockázat igenis bevállalható.

Kiszely Márta szeizmológus azzal lopta be magát a jelenlévők szívébe, hogy tartalmas, élvezetes előadása közben kísérleti eszközökkel végzett bemutatóval és további demonstrációs ötletek felvonultatásával segítette a fizikatanárok módszertani eszköztárát gazdagítani a földrengések témakörének tanításában. A befejezés után köré gyűlő kérdezők száma mutatta a felfokozott érdeklődést.

Egy előadásra a kronológiai sorból kiemelve szeretnék kitérni. Az ankét mottójának szójátéka (3. kép) nem véletlen, arra utal, hogy nem csak a szakmai témákban, hanem az oktatáspolitikai folyamatokban is tájékozódni kíván a fizikatanári társadalom.

Az elmúlt évek (évtizedek?) indulatokat kavarró történései után értékeltük, hogy *Michaletzky György* vál-

alta, hogy – saját szavait idézve – bejön az oroszlánbarlangba. Nem csak információt adott a tanárképzés most zajló átalakításáról, hanem türelemmel viszonyult a kérdések özönéhez is. Meggyőződésem, hogy a kollégák ingerültsége nem elsősorban a módosításoknak szól, hanem annak a ténynek, hogy a döntések az érintettek, a helyzetet leginkább megtapasztalók bevonása nélkül születnek. Az előzetes tájékoztatás hiánya, a sok egymást követő változás és a gyors végrehajtási határidők olyan helyzetekbe kényszerítik a pedagógusokat, amelyben sérül a folytonosság, elavulttá válik a frissen készített segédanyag és olyan tempójú megújulást vár el, amely nem teszi lehetővé a kiérlelést. Az előadó által először felvázolt új képzési rendszer már a 2021. szeptember 15-i kormányrendelet óta ismert. Ennek legkritikusabb pontja, hogy a 10 félév tanulással megszerezhető „fizikatanár” diploma középiskolában tanításra jogosít, de fakultáció vezetésére és emelt szintű érettségizetésre nem. Ahhoz csak sikeres Pedagógus I minősítés birtokában elvégezhető újabb mesterképzés után kapcsolódhat be a pedagógus, ugyanis ekkor lesz „fizika szaktanár”. A képzési és kimeneti követelmények (KKK) tartalma ehhez igazodik. Az akkor még csak terveztként létező leírásban a „fizikatanár” számára megfogalmazott elvárások pusztán a fogalmak, módszerek és a jelenségek ismereti, értelmezési szintjén mozognak. Megdöbbentő volt például szembesülni azzal, hogy a megmaradási törvények ismerete vagy a feszültség értelmezése csak a „fizika szaktanár”-tól várható el. Ne felejtsük el, hogy a KKK nem a középiskolában tanítandó tananyagot, hanem az azt tanító tanár háttértudását írja elő! Joggal vetődik fel a kérdés: mindez nem azt eredményezi-e, hogy az egyetemet befejezők nagy része nem fog tudni újabb fizika iránt elkötelezett és megalapozott tudással rendelkező fiatalokat nevelni? Akkor a mérnöki, fizikusi és fizikatanári pálya létszámcsökkenése valóban megállíthatatlan? Az végképp nem látszik kecsegtető megoldásnak, hogy akik eddig féltek az egyetemi fizikától, azok most már bátran bevállalják, hogy tanárok lesznek. Hiszen tudjuk, hol tartunk létszámban és színvonalban.

Az erővonalak

A fizikatanári ankét azért is nagyszerű rendezvény, mert az előbb felvázolt helyzet ellenére az ott megjelenők között nincs nyoma az elkeseredésnek, nincs hiány érdeklődésben, lelkesedésben és tudásban. Kamerával, jegyzetfüzettel felszerelve vándorolnak a kollégák egyik műhelyfoglalkozásról a másikra, a rövid szünetekben ajánlgatva egymásnak, amit addig láttak.

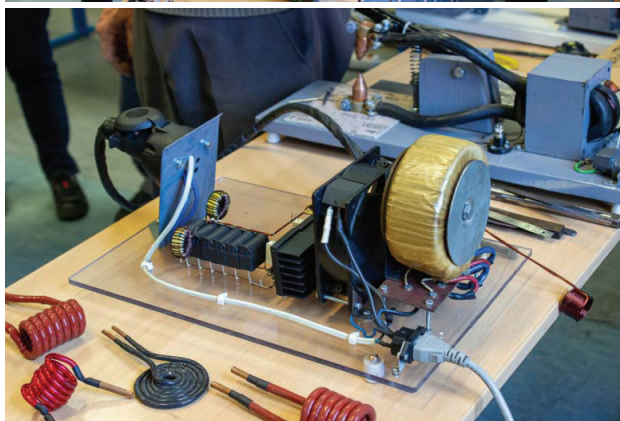
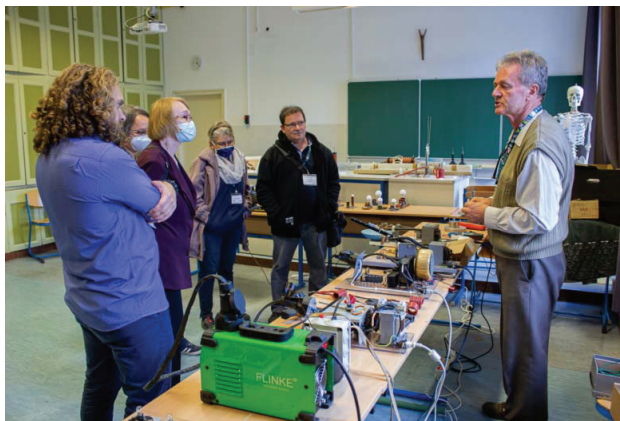
Széles volt a kínálat, nehéz volt választani, mi maradjon ki. Nem meglepő, hogy a műhelyfoglalkozások közel harmada foglalkozott digitális eszközök oktatásban való felhasználhatóságával, és ugyanennyi alkalommal lehetett ötletet gyűjteni projektekről, illetve tábori tematikák ismertetéséből. De láthattuk tan-

anyagban szereplő témakörök feldolgozási módját, egyszerű eszközök készítését és elméleti megközelítésekkel is ismerkedhettünk.

A szerző saját élményei csak szűk keresztmetszetet jelentenek, mégis a motiváló és inspiráló hatás reményében osztja meg tapasztalatait. Borbély Venczeltől egy áramkörépítő alkalmazás (tinkercad.com) ötletét kaptuk, amely a valóságos áramkörü elemekhez jobban hasonlító panelekkel dolgozik. Kiválóan alkalmas az online időszakban a tanulói gyakorlat „helyettesítésére” is. Beszeda Imre foglalkozásán nagy volt a hangzavar, mert az okostelefonokra helyben letöltött Physics Toolbox alkalmazás lehetőségei a fizikatanárokat diákká alakította át, és a hanggenerátor lebegést bemutató működtetése párhuzamosan zajlott a fűtyszó oszcilloszkópos vizsgálatával. Míg ezek a műhelyek egy-egy app fizikatanításba való beillesztését javasolták, ahogy a *Molnár Milán* és *Dömötör Piroska* által ismertetett Tracker program is, addig *Kiss Tamás* egy saját készítésű oktatócsomagot mutatott be, amelynek a közkincsé tételével a magfizika témakörében kívánja segíteni a kollégákat és az érdeklődő diákokat. *Radnai Tamás* mechanikai szimulációk felhasználására tett javaslatai is termékeny talajra hullottak.

Mi fizikatanárok nyitottak vagyunk minden apró, új ötletre, nagyon becsüljük azokat a kollégákat, akik ezt felfedezik és megosztják velünk, de még nagyobb elismeréssel adózunk a térben és/vagy időben kiterjedt komplex projekteknek. A Sinkó Andrea által bemutatott szőlészet-borászat témára felfűzött évszakocon keresztülhúzó ismeretterjesztő és kísérletsorozat, a *Kiliánné Raics Katalin* által megálmodott és megvalósított lézerzóna, vagy a *Baranyai Klára* nevével fémjelzett gimnáziumi fizikatábor, a *Borbélyné Bacsó Viktória* által indított debreceni Innovációs Kutatóműhely vagy a nyíregyházi Egyetem Kreatív Fizikatáborra olyan kezdeményezések, amelyek részben vagy egészben máshol is felhasználhatók, tovább építhetők, megismételhetők. Lehet azt mondani, hogy pályázati pénzből könnyű nagyot alkotni, de a pályázati papírok még egyetlen projektet sem valósítottak meg. Az azon szereplő tervek tanárok szellemi termékei, az elkészült eszközök, kiállítások, a bevont diákok élményei, tudása a megvalósító tanárok nagyon sok energiát igénylő tevékenységének eredményei. Egyébként is szemfülesnek kell lenni ahhoz, hogy az iskolának új és komolyabb eszközök beszerzésére esélye legyen. Úgy mint *Szittyai István* gimnáziumának a spektrofotométer megszerzésére. Használata biztosan siker a tanulók körében is, de a tanárok lelkesedése letagadhatatlan volt.

Azokat a kollégákat is sokan irigykedve és csodálattal figyeljük, akik elektronikai tudásuk és készségeik birtokában hoznak el megmutatni és alkalmaznak saját gyakorlatukban látványos demonstrációkat. *Szász János* kedvenc témájához, az elektromágneses indukcióhoz talál újabb és újabb eszközöket, *Seres István* és társai saját fejlesztésű szenzorokkal csatlakoztak a műholdépítőkhöz. Ez utóbbi kapcsán megjegyzendő, hogy egyértelműen megnőtt a csillagászat



4. kép. Elektromágneses indukció Pál Zoltán tárlásában.

iránti érdeklődés és annak módszertana is új megoldásokkal bővül. Ezt mutatja *Schnider Dorottya* és *Hömöstrei Mihály* exobolygókra vonatkozó tanulói kísérlete, *Tóth Gábor* szupernóva-modellezése, *Margjai Zolt* bolygó légkör-modellje is. Köszönhető ez elsősorban a tantervben való hangsúlyosabb megjelenésnek, de kétségtelen, hogy a diákok is izgalmasabbnak találják, mint egy mechanikai kísérletet, ezért szívesebben is vesznek részt ilyenek készítésében.

Amit biztosan sokan forgatnak a kezükben megfigyelés céljából a műhelyfoglalkozás befejezése után, azok a PET-palackból, otthon található anyagokból készült, vagy esetleg játékboltban megvásárolható eszközök. *Sebestyén Zoltán* rakétái különböző változatokban készülnek, levegővel vagy vízzel működnek. *Orosz László* is a környezetében található tárgyakból válogatva állított össze olyan demonstrációt, amivel a jelenségek komplex voltát igazolta. *Tarján Péter* minden bemutatott eszköze a levegőben volt: vagy repült vagy forgott vagy az elektromos taszításnak szót fogadva lebegett.

Nem csak Faraday-típusú fizikatanárok jönnek az ankétra, hanem Maxwell-típusúak is szép számmal akadnak. *Inczeffly Szabolcs* minden évben más téma elméleti szépségeiben merül el és szívesen tolmácsolja élményeit másoknak is. *Tóth Kristóf* a kvantumszámításokat megalapozó gondolatait osztotta meg. A tudomány és a művészet párhuzama tagadhatatlan. Talán a modern fizika születése kapcsolható össze leginkább olyan zenei és képzőművészeti irányzatok-



5. kép. Hangok gyümölcsből...



6. kép. ...és üvegből.

kal, amelyek formabontóak és frissítő hatásúak voltak. *Bartók* zenéjének diszsonáns hangzása, *Van Gogh* hullámos vonalai, *Monet* ecsetkezelése kapcsán joggal asszociálhatunk a klasszikus fizikát felforgató elméletekre, az anyag kettősségére, a kvantumokra. *Stonawski Tamás* arra vállalkozott, hogy festményeken mutassa meg az erővonalakat, amelyek nem csak a fizikusok fejében léteznek.

Sikeres lépés volt a program olyan módon való kialakítása, amely érdemi időt biztosított az eszközbemutatásra is. A kiállítók ugyanis nem csak a szemnek készítik elő dolgaikat, hanem működés közben is szeretnék azt bemutatni. Ha a bemutatandó eszközrendszer 12 padnyi helyet foglal el, akkor ez időigényes. Pál Zoltán egész elektromosenergia-hálózatot épített fel a napelemtől a transzformátorokon keresztül a fogyasztóig (4. kép).

Sebestyén Zoltán asztala is tele volt maga gyártotta eszközökkel. A 3D-s nyomtatóval készült célirányos eszközök sokak fantáziáját beindította Molnár Milán és Tarján Péter asztalánál. A gyümölcsökből készített galvánelem minden fizikatanár tarsolyában benne van, de az almák és répák kondenzátorként hanggenerátor működtetésére való alkalmazása, és függesztett borosüvegekkel hangszerarzenállá formálása szintén mindenkinek új volt (5. és 6. kép).

A bor Beszeda Imre asztalánál is szerepet kapott, ahol az ital vezetőkéességét mérték. Az emelt szintű

érettségi egy másik feladata *Piláth Károly* standján bukkant fel, több más microcontroller társaságában. Stonawski Tamás a matematikai és a cikloidális ingával kapcsolatos ismereteinket pontosította demonstrációs eszköze segítségével. Háta mögött saját festésű, nevezetes tudománytörténeti momentumokat megörökítő képeit láthattuk.

Az anket el- és kihagyhatatlan programja a tízperces kísérletek esti bemutatója. Valódi szórakoztató produkcióval indult a műsor Beszeda Imre, Marjai Zsolt, Stonawski Tamás és Tarján Péter sajátos zeneeszközeivel. Fizikatanári mivoltukból nem tudtak kibújni, ezért a hangkeltés fizikáját is ismertették a papuccsal vert csövek, a megfogdosásra reagáló gyümölcsök, a vízzel töltött üvegek és a köcsögduda esetén is. Molnár Milán szappanbuborékjai nagyon szemléletesen játszották a töltéshordozók szerepét a Van de Graaff-generátor terében (7. kép). Három fellépő is kihasználta az esti sötétség lehetőségeit. A Tesla-tekercs közelében felgyulladó neoncső Pál Zoltán kezében, vagy Piláth Károly okostelefonnal gerjesztett, UV fényben felragyogó állóhulláma, ugyanolyan sikeres volt, mint Orosz László izzóinak fénye, amihez emberek teste vezette az áramot (8. kép).

Tarján Péter a 10 Ft-os irreverzibilis „transzmutációját” mutatta be, majd *Szegedi Dezső* humorral fűszerezett pingponglabdás kísérletein jókat derült és sokat tanult a közönség. A fagyos idő ellenére a kö-

7. kép. Molnár Milán töltéshordozó szappanbuborékjai.



8. kép. Az emberi test jó vezető.



zönség Sebestyén Zoltán szabadtéri rakétakilövésére is kitódult (9. kép).

Jó hangulatban, a látottakat élénken tárgyalva fejeződött be ez az este, ahogy a két nappal korábbi Hártelein Károllyal töltött is.

A remanencia

Velünk maradó élményt, tudást, ötleteket, lelkesedést hoztunk haza. Jó páran emléklapot, oklevelet és díjat is. Álljon itt azok neve, akik a szakmai közönség elismerését leginkább kivívták e rendezvényen (10. kép).

Az eszközkiallítók közül a díjazottak:

1. Pál Zoltán
2. Piláth Károly
3. Sebestyén Zoltán

Különdíjat kapott Stonawski Tamás

A műhelyvezetők között a bizottság és a közönség véleménynyilvánítása alapján olyan sorrend alakult ki, amely többszörös holtverseny is jelentett.

1. hely: Beszeda Imre – Hangolj a mobilodra, hallható kísérletek és mérések
2. hely: Borbély Venczel – Virtuális elektromosság kísérletek nem csak online
2. hely: Dömötör Piroska és Molnár Milán – Tracker videóelemző szoftver
3. hely: Baranyai Klára és társai – Projektek a Berzsenyi Dániel Gimnázium fizikatanácskozásában
3. hely: Kis Tamás – Komplex magfizikai oktatócsoport – az Interneten
3. hely: Tarján Péter – A repülés fizikája

Különdíjban részesült Sebestyén Zoltán – Kísérletek

10 perces kísérletek közül a közönség tetszését leginkább a következő kollégák és produkciók nyerték el:

1. Szegedi Dezső: Pingponglabdák
2. Molnár Milán: Buborékáram

10. kép. Az anket díjazottjai.



9. kép. A rakéta felszállt.

3. Beszeda Imre, Marjai Zsolt, Stonawski Tamás, Tarján Péter: Sörimba, borimba és egyéb köcsög-papucs hangszerek.



Ha összegző értékelést kellene megfogalmazni az azt a gondolatot csalogatná elő, milyen kár, hogy az utánpótlás ilyen nehézkes. Ennyi energia, kreativitás az összes iskolába elég lenne, ha szétoszthatnánk. A szakmai hivatástudat és elkötelezettség, a tanulást támogató attitűd, a módszertani sokszínűség – ezek a pályamodell szerint elvárt pedagóguskompetenciák – olyan intenzíven vannak jelen a fizikatanításban, hogy értetlenül állunk a népszerűtlenség és a kritika keresztüztében. Az alacsony óraszámok kényszerében sokan magányos harcosként tértek haza, de a négy nap alatt feltöltöttünk, és hiszünk a töltésmegmaradásban. Óráinkon igyekszünk szikrát gyűjteni diákjainkban és számukra is vonzóvá tenni a fizikát.

Viszontlátásra Pécsen vagy Szombathelyen.

A FIZIKAI SZEMLE LXXI. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

<p><i>Abonyi Iván:</i> Műholdak és az általános relativitáselmélet 75</p> <p><i>Angeli István:</i> Út a nagyszögű alfa-szóráshoz 190</p> <p><i>Bányász István:</i> Tökéletlen holográfia 409</p> <p><i>Barna Péter, Gyulai József, Menyhárd Miklós, Pécz Béla:</i> Gergely György (1923–2020) 15</p> <p><i>Bebesi Zsófia, Jubász Antal:</i> A folyékony víz nyomában a Naprendszerben 217</p> <p><i>Biró László Péter, Pécz Béla:</i> Gyulai József, 1933–2021 90</p> <p><i>Bognár Gergely:</i> A Galilei-per és ami mögötte van . 338</p> <p><i>Bognár Gergely:</i> Megoldotta-e a fizika Zénón paradoxonjait? 238</p> <p><i>Csedreki László, Gyürky György, Szűcs Tamás:</i> Az Univerzum születésének vizsgálata a föld alól . 185</p> <p><i>Cseh József:</i> Égi harmónia és dinamikai algebra . . 181</p> <p><i>Csősz Gábor, Simon Ferenc:</i> Szupravezető anyagok nagyfrekvenciás tulajdonságai 145</p> <p><i>Elekes Zoltán:</i> Különleges szigetvilág a neutrongazdag atommagok tengerén 329</p> <p><i>Fejős Gergely:</i> Absztrakt vektorfogalom és kvantummechanika 10</p> <p><i>Füri Péter:</i> Köhögéskor kibocsátott, kórokozó tartalmú cseppek légzőrendszeri kiülepedésselőzlása 117</p> <p>Helyreigazítás 436</p> <p><i>Horváth Dezső:</i> Az elképesztő gyenge erő (kölcsönhatási furcsaságok) 294</p> <p><i>Horváth Dezső:</i> Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmek – 1., 2. rész 37, 84</p> <p><i>Horváth Dezső:</i> Steven Weinberg, 1933–2021 293</p> <p><i>Horváth Gábor, Virágh Balázs, Horváth Dániel, Slíz-Balogh Judit, Horváth Ákos, Egri Ádám, Jánosi Imre:</i> Miért keletre néz a Napot már nem követő napraforgók (<i>Helianthus annuus</i>) virágzata? – 1., 2. rész 226, 300</p> <p><i>Illy József:</i> Ki találta föl az Einstein–Szilárd-féle hűtőszekrényt? 43</p> <p><i>Jáger Gabriella, Tomán János, Erdélyi Zoltán:</i> Beágyazott kvantumpöttyök és plazmonikus nanorészecskék létrehozása önszerveződéssel . 414</p> <p>Kádár György helyreigazító megjegyzése 16</p> <p><i>Kálmán Péter, Keszthelyi Tamás:</i> Anomáliák a magfizikában 234</p> <p><i>Kondor Imre:</i> Giorgio Parisi Nobel-díja 365</p> <p><i>Kovács Tamás:</i> Poincaré-féle visszatérési térképek és alkalmazásuk 401</p> <p><i>Kovács Zoltán, Udvarnoki Zoltán, Papp Eszter, Horváth Gábor:</i> A holdillúzió pszichofizikai vizsgálata festményeken és természetfotókon – 2. rész: A holdillúzió festményeken és fényképeken mért értéke 3</p>	<p><i>Laczik Bálint, Póka György:</i> Tükrös anamorfózis . . 332</p> <p><i>Lendvai János:</i> Januári újdonságok az interneten 1</p> <p><i>Molnár János Albert:</i> Egy kéttáblás síófoki napóra . 245</p> <p><i>Pálfalvi László, Kovács Vivien:</i> A Green-féle reciprocitási tétel és néhány folyománya – 1., 2. rész 241, 309</p> <p><i>Polónyi János:</i> Kvantummechanika: a láthatatlan forradalom – 1., 2. rész 109, 156</p> <p><i>Radics Bálint, Trócsányi Zoltán:</i> A CP-sértés nagysága a leptonszektorban 81</p> <p><i>Staar Gyula:</i> Egy elegáns úr a fizika világában – a 90 éves Abonyi Iván köszöntése 73</p> <p><i>Szarka László Csaba:</i> Albedómérés földfényvel . . . 375</p> <p><i>Szatmáry Károly, Mészáros Richárd:</i> Léteznek-e a Naprendszerre hasonlító bolygórendszerek? . . . 92</p> <p><i>Tibai Zoltán, Turnár Szabolcs, Kovács Bálint, Pálfalvi László, Almási Gábor, Hebling János:</i> Részecskegyorsítás extrém nagy térerősségű terahertzes impulzusokkal 47</p> <p><i>Weidinger Tamás, Pongrácz Rita, Tasnádi Péter:</i> A 2021. évi Fizikai Nobel-díj éghajlatkutató nyertesei 369</p>
VÉLEMÉNYEK	
	<p><i>Bognár Gergely:</i> Lábjegyzet a tehetetlenség törvényének kialakulásához 53</p>
A FIZIKA TANÍTÁSA	
	<p><i>Baranyai Klára, Lendvai Dorottya, Csernóvsky Zoltán, Izsa Éva, Csonka Dorottya, Gál Györgyné, Vidra Ágnes, Virág Miklós, Varga György:</i> Tehetség gondozás a budapesti Berzsenyi Dániel Gimnázium fizikáttáborában . 135</p> <p><i>Bartos-Elekes István:</i> Kísérletek nemlineáris mágneses anyagokkal a nagyváradi Ady Endre Líceum fizikumában 267</p> <p><i>Beszeda Imre, Stonauski Tamás:</i> Kreatív Fizika Tábor 360</p> <p><i>Bognár Gergely:</i> Karantén alatti kísérleteim 131</p> <p><i>Csontosné Herendi Borbála:</i> Tanítási kísérlet modern „clicker”-ek segítségével 355</p> <p><i>Delbács Nauszika:</i> A víz forráspontjának mérése a Mont Blanc tetején 35</p> <p><i>Fábián Erik, Kékesi Attila, Rajkai Tamás:</i> Rezonanciakísérlet myDAQ eszközzel 122</p> <p><i>Farkas László:</i> Újra lengett a keszthelyi Fő téri templomban Kunc Adolf Foucault-ingája 288</p> <p><i>Holics László:</i> Válaszlevél 62</p>

<i>Horváth Gábor, Vass Miklós:</i> Egy biológiaérettségi-feladat biomechanikai hibái . . .	204	<i>Ujfaludi László:</i> Fizika és képzőművészet – műelemzések fizikus szemmel – 2. rész	17
<i>Horváth Péter:</i> „Fegyelmzett érdeklődéssel nyúlj bármilyen problémához” – a 90 éves Wiedemann László köszöntése	56	<i>Varga János:</i> Járművek mozgásának fizikája	172
<i>Jaloveczki Gábor, Jaloveczki József, Renkus Tibor:</i> Egy kevésbé ismert biliárdjáték, a műlökés	254	<i>Vida Mária:</i> A szegmotor	27
<i>Kirsch Éva:</i> A vonzás hatalma	429	<i>Vitkóczy Fanni, Pilát Károly, Kopasz Katalin:</i> Ultrahanghullámok interferenciájának demonstrálása Arduinóval	284
<i>Kirsch Éva:</i> Ecsetvonások két tanári szakmai rendezvény kapcsán	29	<i>Wiedemann László:</i> Egzaktság és ismeretterjesztés	57
<i>Kiss Miklós:</i> A Mikola-verseny gyöngyösi döntőjének mérési feladatairól	322	SZÓRAKOZTATÓ FIZIKA	
<i>Kiss Miklós:</i> Gravitációról középiskolában – másként	23	<i>Horváth Dezső:</i> Humor a tudományban, tudomány a humorban	291, 328, 399
<i>Komáromi Annamária:</i> Űrtevékenységről a középiskolában – műholdas távérzékelés	169	HÍREK – ESEMÉNYEK	
<i>Kuczmann Imre:</i> A lendület és a perdület összefüggése a Lorentz-transzformációval	126	<i>Aszódi Attila:</i> Csom Gyula, 1932–2021	314
<i>Nógrádi Zsófia:</i> Szabadulószoa a fizikaórán	198	Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2021. évi Küldöttgyűlése	395
<i>Pálfalvi László, Kovács Vivien:</i> A $pV^{\kappa} = \text{állandó}$ törvény alkalmazhatóságáról egy versenyfeladat tükrében	380	Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Elnökségének nyilatkozata	144
<i>Radnóti Katalin:</i> A megismerés kalandja – a ismeretszerzés tudományos módszereinek bemutatása a fizikaoktatásban	384	<i>Bakonyi Imre, Révész Ádám:</i> Takács László, 1950–2019	140
<i>Schnider Dorottya, Hömöstrei Mibály:</i> Hagyományos vagy digitális? Melyik a nyerő?	97	<i>Groma István:</i> Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2021. évi tagdíjairól	36
<i>Schnider Dorottya, Hömöstrei Mibály:</i> Kompetenciafejlesztő fizikatanítás	421	Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira	72
<i>Simon Péter:</i> A Mikola-verseny első negyven éve	316	<i>Kardon Béla:</i> Hrehuss Gyula, 1932–2020	142
<i>Simon Péter:</i> A Mikola-verseny pécsi döntőjének három mérési feladatáról	343	Kitüntetések	144
<i>Simon Tamás, Dálya Gergely, Hömöstrei Mibály:</i> A bolygók körüli holdak számának meghatározásáról	246	<i>Kovács Ádám, 1933–2021</i>	215
<i>Siposs András:</i> Holics Tanár Úr 90 éves	61	<i>Lendvai János:</i> Radnai Gyula, 1939–2021	216
<i>Siposs András:</i> Mit is csinál a síktükrök a jobb meg a bal oldallal?	130	Mezei Ferenc kapja a 2021. évi Lise Meitner-díjat	216
<i>Stonawski Tamás:</i> Az aranymetszés és más arányok	262	<i>Pápai Gyula:</i> Nagy Márton, 1932–2021	143
<i>Szeidemann Ákos, Gróf Andrea, Tél Tamás:</i> Mozgás a forgó Földön: a ciklonoktól az Eötvös-mérlegig	258	<i>Raics Péter, Nagy Sándor:</i> Csikai Gyula, 1930–2021	178
<i>Takács László:</i> Útmutatóm a fizikatanításhoz	134	<i>Rajkóvits Zsuzsanna:</i> Magyar sikerek a 2021. évi ICYS versenyen	180
<i>Takátsné Lucz Ildikó, Tasnádi Péter:</i> Villámok az új Nemzeti Alaptanterv tükrében	102	<i>Szőkefalvi-Nagy Zoltán:</i> Idén lett volna 75 éves, de már 10 éve nincs közöttünk Kajcsos Zsolt	393
<i>Tasnádi Anikó Márta:</i> A hőszivattyú	163	Tichy Géza (1945–2021)	69
<i>Tichy Géza, Vankó Péter, Vigh Máté:</i> A 2020. évi Eötvös-verseny eredményhirdetése	63	<i>Vida József:</i> Patkó György, 1933–2020	141
<i>Tóth Kristóf:</i> A kvantumhatározatlanság a kvantummechanika fénypolarizációs modelljében	349	<i>Vincze János:</i> Hatvan éve vette át Nobel-díját Békésy György	436
<i>Tóth Kristóf:</i> Modell kvantummechanika középiskolában	209	„Bonis bona – a nemzet tehetségeiért” életműdíjat kapott Kovács László és Varga Balázs Domokos	394
<i>Tóthné Juhász Tünde:</i> Üveg megfűjásával keltett hang frekvenciájának vizsgálata Audacity programmal	280	www.fizikaiszemle.hu/mellekletek	
		<i>Bartos-Elekes István:</i> Számítógépes időközmérés a nagyváradi Ady Endre Líceum Fizikumában	
		<i>Kármán Tamás:</i> A Fizikai Szemle 2022. évi falinaptára	

HATVAN ÉVE VETTE ÁT NOBEL-DÍJÁT BÉKÉSY GYÖRGY

A magyar természettudományos történelem egyik jelentős dátuma 1961. december 10., mert ekkor vette át *Békésy György* az orvosi Nobel-díját „A fül csigájában létrejövő ingerületek fizikai mechanizmusának felfedezéséért”. Békésy Györgyről számos cikk jelent meg, könyvek foglalkoznak életművével [1–3], Hold-kráter (átmérő 96 km, szélesség: 52° É, hosszúság: 127° K) viseli nevét.

Békésy halláselelmélettel kapcsolatos kísérleteit a 700 oldalas *Experiments of Hearing* könyvben foglalta össze 1960-ban, majd 1966-ban a *Sensory Inhibition* című kötetben publikálta kutatásait. Mindkét könyv – mind a mai napig – alapvasmány annak, aki e kérdéskörrel szeretne behatóbban foglalkozni. Meg kell említeni a Nobel-díj átvételekor tartott előadása címét: *A megfigyelés örömről és a belső fül működéséről*.

Kevésbé ismert, hogy Békésy jelentős műgyűjtő is volt, több száz darabból álló gyűjteményét végrendeletében a Nobel Alapítványra hagyta, amiből 1974-ben állandó kiállítást nyitott meg *XVI. Károly Gusztáv* svéd király, aki a következőket mondta: „A Nobel Alapítvány – Alfred Nobel után – Békésy Györgytől kapta a legnagyobb értékű adományt.”

Vincze János, Budapest



Az 1961. évi Nobel-díjasok. Balról-jobbra: Melvin Calvin (kémiai), Rudolf Ludwig Mössbauer (fizikai), Békésy György (fiziológiai és orvostudományi), Robert Hofstadter (fizikai) és Ivo Andrić (irodalmi). Dag Hammarskjöldöt (1905–1961) ugyanezen évben, Nobel-békédíjjal tüntették ki posztumusz, mert 1961. szeptember 18.-án repülőgépszerencsétlenségben elhunyt.

Irodalom

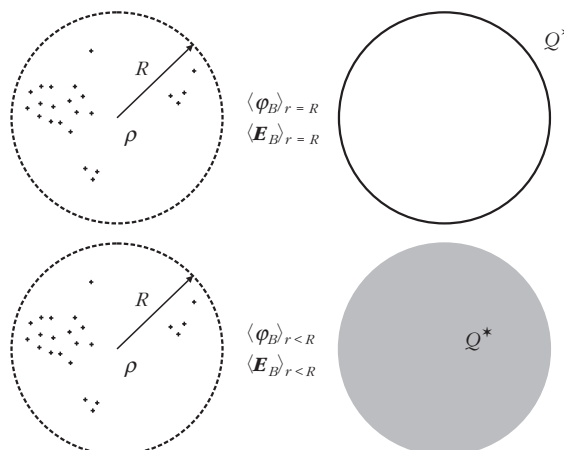
1. Dániel József: *Békésy György*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1990.
2. Vincze János: *nemes Békésy György*. NDP Kiadó, Budapest, 2019.
3. Vincze János: *The Nobel-prize, biophysician Georg von Békésy's – path of life*. NDP Kiadó, Budapest, 2021.

HELYREIGAZÍTÁS

Folyóiratunk 2021. július–augusztusi száma 242. oldalán, a *Pálfalvi László* és *Kovács Vivien* által publikált, *A Green-féle reciprocitási tétel és néhány folyománya* című cikk 1. részében hibásan jelent meg az 1. ábra alsó fele.

Az ábra ezen, immár kijavított részét újra közöljük, egyben elnézést kérünk az érdeklődő olvasóktól és a szerzőktől.

A szerkesztők



Pályázati felhívás a Matematika és Fizika Mindenkinek versenyre

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kara a Bay Zoltán Tudomány és Technikatörténeti Alapítvánnyal együttműködve a 2021-2022-es tanévben is meghirdette a **Matematika mindenkinek és Fizika mindenkinek országos csapatversenyt** a középiskolák 9–13. osztályos tanulói számára.

A versenyen olyan szabadon választható témák feldolgozását várjuk (például prezentáció, videó, animáció vagy demonstráció formájában), amelyeken keresztül szemléletesen bemutatható a matematika és fizika jelenléte más tudományágakban, a különböző művészeti ágakban, a mérnöki tevékenységben, illetve a mindennapok gyakorlatában. A szakmai zsűri a bírálat során előnyben részesíti a saját készítésű kísérletek, modellek bemutatását. A zsűri értékelése alapján továbbjutó pályázatokat a csapatoknak személyesen kell majd bemutatniuk a döntő helyszínén (Budapesten), vagy online közvetítve.

A versenyen 3 fős diákcsoportok indulhatnak négy kategóriában:

Fizika I.:

9–10. évfolyamosok csapata;

Fizika II.:

11–13. évfolyamosok csapata

Matematika I.:

9–10. évfolyamosok csapata

Matematika II.:

11–13. évfolyamosok csapata

A pályaművek benyújtásának határideje:

2022. február 28.!

A csapatok a nevezésüket a pályamű benyújtásával egyidejűleg tehetik meg!
A versenyre jelentkezés és a részvétel díjmentes.



Az első forduló eredményeiről március 10-én küldünk értesítést.

A döntők időpontja: matematikából április 6. 14:00 óra, fizikából április 7. 14:00 óra.

A versenyek részleteiről és lebonyolításáról a <http://www.vik.bme.hu/matfiz> oldalon olvashatnak, ahonnan a versenyfelhívás is letölthető PDF formátum.

Egyúttal felhívjuk figyelmüket a BME VIK alábbi rendezvényeire is, ahol a diákok tájékozódhatnak a karon folyó szakmai munkáról és továbbtanulási lehetőségekről:

- **BME Lányok Napja – 2022. április vagy október**
- **BME VIK Nyitott laborok délutánja – 2022. október**
- **BME Nyílt nap – 2022. október**
- **igény szerint bemutatkozó előadások tartása a középiskolában**

Üdvözlettel

Richlik-Horváth Katalin
a zsűri elnöke

Dr. Kovács Kálmán
docens, BME VIK

Dr. Kádár György
főtitkár, BZA